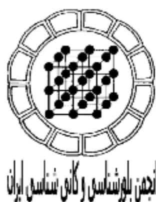
مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران

مقاله پژوهشی

سال بیست و هشتم، شمارهٔ سوم، پاییز ۹۹، از صفحهٔ ۵۵۷ تا ۵۷۶



شیمی کانی و زمین دما-فشارسنجی سنگ‌های رسی دگرگون شده مجموعه دگرگونی گیسور، شرق گناباد

عبدالصمد پورمحمد[۱]، احمد احمدی‌خلجی[*۱]، مسعود همام[۲]، محمد ابراهیمی[۳]، رسول اسمعیلی[۳و۴]، زهرا طهماسبی[۱]

۱- گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه لرستان

۲- گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان

۴- انستیتو زمین شناسی و ژئوفیزیک، آکادمی علوم، پکن، چین

(دریافت مقاله: ۹۸/۶/۴، نسخه نهایی: ۹۸/۹/۶)

چکیده: منطقه گیسور در شرق شهرستان گناباد، بخشی از شمال قطعه لوت محسوب می‌شود. سنگ‌های این منطقه شامل سنگ‌های گرانیتوئیدی و مجموعه دگرگونی هستند. در سنگ‌های متاپلیتی (رسی دگرگونه) این منطقه وجود شیستوارگی S_1 و کانی کلریتوئید شاخص دگرگونی ناحیه‌ای است و به عنوان شواهد دگرگونی مجاورتی می‌توان به وجود بافت‌های تصادفی در کانی‌های آندالوزیت، استارولیت، مسکوویت؛ گارنتِ پس از زمین ساخت و رشد سیلیمانیت منشوری به درون لبه آندالوزیت اشاره کرد. گارنت دارای دو مرحله رشد بوده و بیشتر دارای اعضای پایانی آلماندین، گروسولار و اسپسارتین است. کلریتوئید و استارولیت از نوع آهن‌دار هستند. مسکوویت کمی جایگزینی از نوع پاراگونیت دارد. کلریتی شدن بیوتیت و گارنت، سریسیتی شدن آندالوزیت و بروز ریزترک‌های شعاعی در گارنت همه نشان دهنده یک دگرگونی پسرونده و بالاآمدگی هستند. براساس روش‌های زمین دما-فشارسنجی مرسوم، دما و فشار این مجموعه دگرگونی در گستره‌های ^{o}C ۶۰۸ – ۵۵۰ و kbar ۴٫۵ - ۳٫۸ برآورد شدند. وجود ریزترک‌های شعاعی پیرامون میانبارهای کوارتز در گارنت ناشی از یک مؤلفه بزرگ کاهش فشار همدماست.

واژه‌های کلیدی: *گیسور؛ گناباد؛ دگرگونی ناحیه‌ای؛ دگرگونی مجاورتی؛ زمین دما-فشارسنج؛ قطعه لوت.*

مقدمه

قطعه لوت را نخستین بار اشتوکلین [۱] به عنوان یکی از ۹ پهنه ساختاری در شرق ایران معرفی کرد. او و همکارش مرز شرقی قطعه لوت را گسل نهبندان و حوضه فلیش شرق ایران و مرز غربی آن را گسل نایبند و قطعه طبس مشخص کردند [۲]. مرز شمالی این قطعه با فروافتادگی جنوب کاشمر و مرز جنوبی آن به فرونشست جازموریان بسته می‌شود. از ویژگی‌های بی مانند قطعه لوت، فعالیت ماگمایی آن بوده که از ژوراسیک آغاز شده و در ترشیاری به اوج خود رسیده است [۳]. در ارتباط با چگونگی فعالیت‌های زمین‌ساختی ماگمایی در این قطعه نظریه‌های مختلفی ارائه شده است؛ برخی آن را مربوط به پدیده‌هایی چون فرورانش [۴، ۵]، شرایط کششی [۶] و حتی فرورانش دوسویه [۷] نسبت داده‌اند. از جمله فعالیت‌های ماگمایی در قطعه لوت، توده گرانودیوریتی گیسور است که بر سازندهای کنار خود اثر گذاشته و آن‌ها را دچار دگرگونی مجاورتی کرده است.

مجموعه دگرگونی گیسور در ۵۸ کیلومتری شرق شهرستان گناباد قرار دارد و بخشی از ناحیه شمالی پهنه ساختاری قطعه لوت به شمار می‌آید [۸]. این منطقه بخشی از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ نوده [۹] و نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ گناباد [۱۰] به

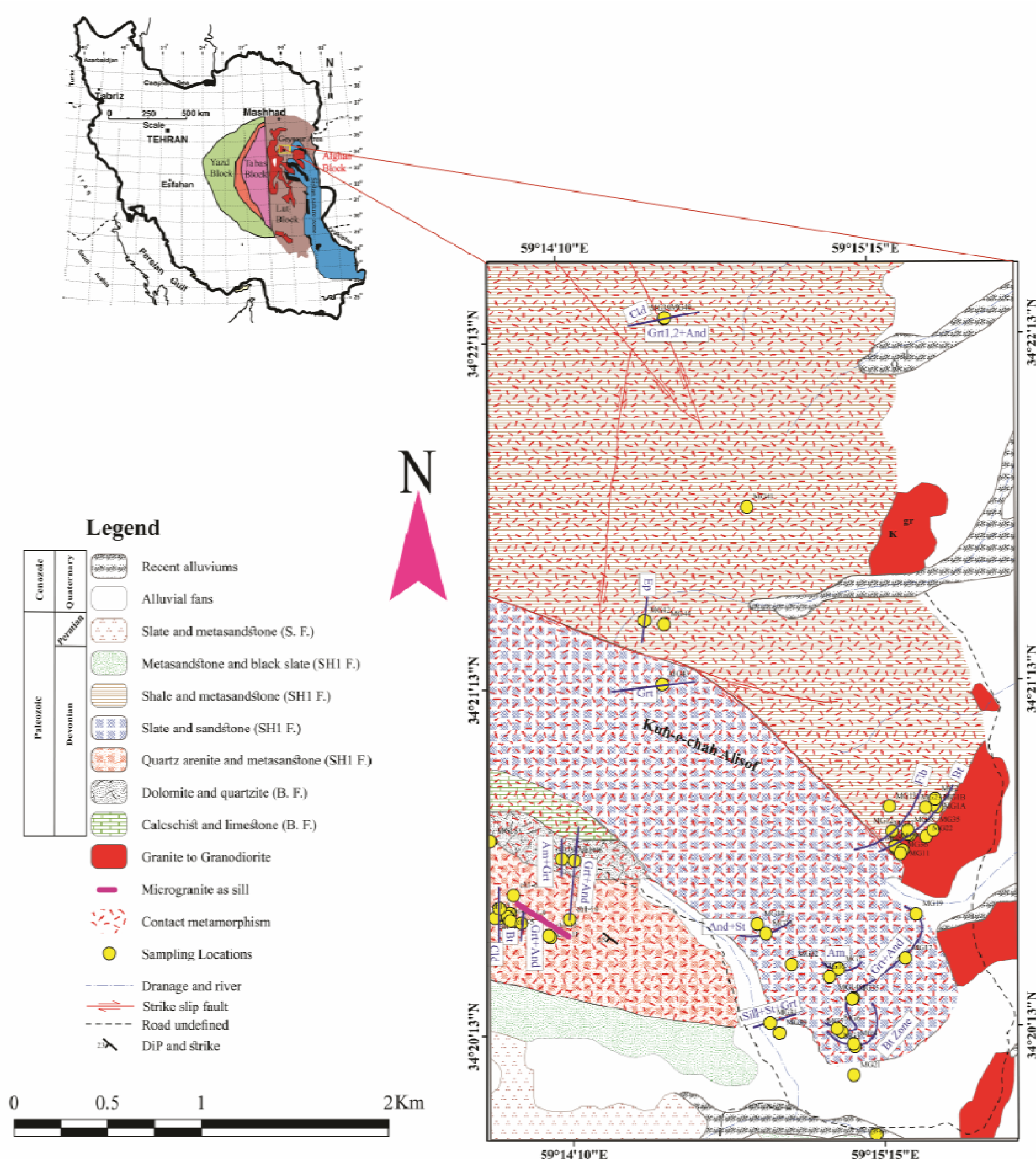
*نویسنده مسئول، تلفن-نمابر: ۰۶۶۳۳۱۲۰۶۱۹، پست الکترونیکی: ahmadikhalaj.a@lu.ac.ir

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.3.2.6]

[DOI: 10.29252/ijcm.28.3.557]

مختصات طول جغرافیایی ۵۹° ۱۳′ ۵۲″ تا ۵۹° ۱۵′ ۴۲″ شرقی و عرض جغرافیایی ۳۴° ۱۹′ ۵۴″ تا ۳۴° ۲۲′ ۲۴″ شمالی است (شکل ۱).

از جمله پژوهش‌های انجام شده در این منطقه، بررسی‌های شرکت فرانسوی B.R.G.M. بوده است که در کنار بررسی های زمین شیمیایی عناصر، اقدام به سن‌سنجی بر زیرکن‌های موجود در گرانیت‌های گیسور با روش U-Pb کردند [۱۱]. کریم‌پور و مرادی [۱۲] با استفاده از روش U-Pb در زیرکن، در گستره نقشه‌های زمین‌شناسی نوده و گناباد [۹، ۱۰]، سن توده‌های مونزونیتی نجم‌آباد (۳۹/۹ میلیون سال) را تعیین کردند. جوادی [۱۳] سنگ‌های دگرگونی منطقه گیسور را وابسته به دگرگونی ناحیه‌ای و مجاورتی دانسته و هاله دگرگونی مجاورتی را با نوع 2b همسان می‌داند. برای مجموعه دگرگونی گیسور بررسی های دقیق و منسجمی صورت نگرفته است. بررسی این مجموعه و ارتباط آن با توده گرانودیوریتی گیسور کمک شایانی به شناخت جایگاه زمین‌ساختی و فعالیت ماگمایی شمال قطعه لوت خواهد کرد. از این رو، در این پژوهش افزون بر آزمون روش‌های مختلف برای تعیین شرایط دگرگونی، ویژگی‌های صحرایی، سنگ‌نگاری، شیمی کانی و مسیر تکاملی سنگ‌های دگرگونی گیسور بررسی شده است.



شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی، برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی نوده [۹] بـا کمـی تغییـرات. علائـم اسـتفاده شـده در راهنمای نقشه عبارتند ازB.F= سازند بهرام، .SH1.F= سازند شیشتو ۱ و .S.F= سازند سردر. محل کانی‌های شاخص بر نقشه مشخص شده اسـت.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.3.2.6]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.3.557]

مواد و روش‌ها

در راستای بررسی واحدهای سنگی مجموعه دگرگونی گیسور در ۵۲ ایستگاه نمونه‌برداری شد که در کنار بررسی صحرایی و سنگ‌شناسی از آنها تعداد ۴۹ مقطع نازک به منظور سنگ‌نگاری تهیه شد. از میان نمونه‌های برداشت شده، تعداد ۲ نمونه برای بررسی های زمین شیمیایی سنگ کل انتخاب و پس از خردایش برای تجزیه شیمیایی به آزمایشگاه ACME ونکور کانادا فرستاده شد عناصر اصلی به روش طیف سنجی نشر اتمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-AES) تجزیه شد. از بین مقاطع نازک، ۳ نمونه با بیشترین تعداد کانی برای تجزیه ۱۱۵ نقطه انتخاب و توسط دستگاه ریزکاو الکترونی کامکا مدل SX Five با ولتاژ شتاب دهنده 15 kV و جریان پرتو 20 nA (اندازه پرتو 5 µm) در موسسه زمین‌شناسی و زمین فیزیک انجمن علوم کشور چین (IGG-CAS) بررسی شدند. در این بررسی در حد ممکن از داده‌های با اعتبار کافی استفاده شد. نتایج به کمک نرم افزارهای گوناگون از قبیل Thermocalc v.3.7 [۱۴] با بانک اطلاعاتی tcds55، Gibbs [۱۵]، GTB v.2.1 [۱۶]، WinCcac [۱۷] و Theriak-Domino [۱۸] با بانک اطلاعاتی tcdb55 پردازش شد و اساس تجزیه و تحلیل قرار گرفت. علائم بکار رفته در این نوشتار برگرفته از مراجع [۱۹،۲۰] است.

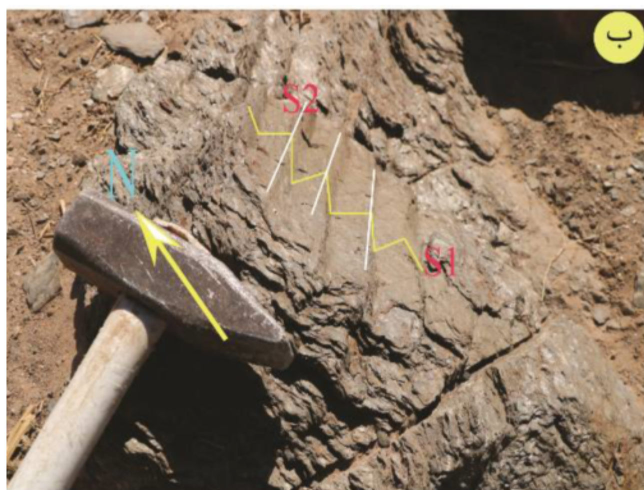
زمین‌شناسی

مجموعه دگرگونی گیسور در اثر توده‌های نفوذی دارای طیف گوناگونی از سنگ‌های اسلیت و فیلیت تا انواع شیست‌ها (کلریتویید شیست، گارنت شیست، بیوتیت-استارولیت-گارنت شیست، آندالوزیت شیست، سیلیمانیت-آندالوزیت شیست، آندالوزیت-گارنت شیست و آندالوزیت- سیلیمانیت-استارولیت-گارنت شیست) است. این مجموعه با رنگ سبز در بین سایر سازندهای منطقه قابل تشخیص است و در آن، ساختار بودین و ریزچین‌ها دیده می‌شوند. بودین‌شدگی در راستای شمال‌شرقی – جنوب‌غربی و موازی با محور ریزچین‌ها رخ داده و خطواره‌های یکسانی ایجاد کرده است. بعبارت دیگر، راستای کشش بودین موازی راستای خطواره ریزچین‌هاست (شکل ۲). راستای شیستوارگی شمال‌غربی – جنوب‌شرقی با شیب به سمت جنوب‌غرب است. شیستوارگی با آذرین لایه میکروگرانیتی همراستاست [۲۱]. این منطقه در معرض گسل‌های راستا لغز بوده که حرکات آن‌ها بر سنگ‌های پیرامون اثر گذاشته‌اند (شکل ۱). در برخی موارد، سنگ‌های گرانیتی پیرامون گسل‌ها خرد شده و به سوی میلونیتی‌شدن پیش رفته‌اند.

در شرق منطقه مورد بررسی و در کنار توده گرانیتوئیدی گیسور درون شکستگی‌های میکاشیست‌ها، رگچه‌هایی بسیار متراکم از تورمالین با پهنای ۱۰ cm دیده می‌شوند. در این مجموعه، رگه‌های پگماتیتی سرشار از مسکوویت‌های درشت و تورمالین قابل مشاهده‌اند که به احتمال بسیار در ارتباط با جریان سیال‌های بورداری است که از توده گرانیتوئیدی شکل گرفته‌اند. در لبه‌های توده، سنگ‌های دگرگونی دارای بیوتیت یا به عبارت دیگر بیوتیت شیست‌ها تشکیل شده‌اند. در ضلع شرقی، پس از بیوتیت شیست‌ها، بیوتیت-فیبرولیت شیست‌ها قرار دارند که به احتمال بسیار فیبرولیت در اثر سیال‌های اسیدی از بیوتیت شکل گرفته است [۲۲]. در انتهای ضلع غربی، کلریتوئید شیست‌ها رخنمون دارند. همچنین کلریتوئید شیست‌ها در ضلع شمالی دیده می‌شوند که با آندالوزیت همراهی می‌شوند. در این بخش، آندالوزیت - گارنت شیست نیز دیده می‌شود. در بخش مرکزی و شرقی، اپیدوت شیست‌ها به همراه آندالوزیت شیست‌ها به طور متناوب قرار گرفته‌اند که به احتمال بسیار در ارتباط با تغییر ترکیب محلی است. در ضلع جنوبی، گارنت بصورت گسترده‌تر، استارولیت و سرانجام سیلیمانیت منشوری دیده می‌شوند (شکل ۱). بنابراین در بخش جنوبی، افزایش دما بیشتر بوده است و ضلع شرقی بیشتر در معرض سیال‌های بوردار و اسیدی بوده است. برخی از کانی‌ها مانند آندالوزیت، استارولیت و مسکوویت بطور تصادفی در سنگ‌ها رشد کرده‌اند که نشانگر افزایش دمای ناشی از نفوذ توده‌های آذرین گرانیتوئیدی است. اندازه بلورهای آندالوزیت و گارنت به ترتیب به ۸ و ۰٫۶ cm می‌رسد. افزون بر این، در کنار آذرین لایه میکروگرانیتی، گارنت به رنگ قرمز آلبالویی رشد کرده است. آندالوزیت‌های موجود در بخش شمالی و غربی به شدت دگرسان و سریسیتی شده‌اند.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.3.2.6]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.3.557]





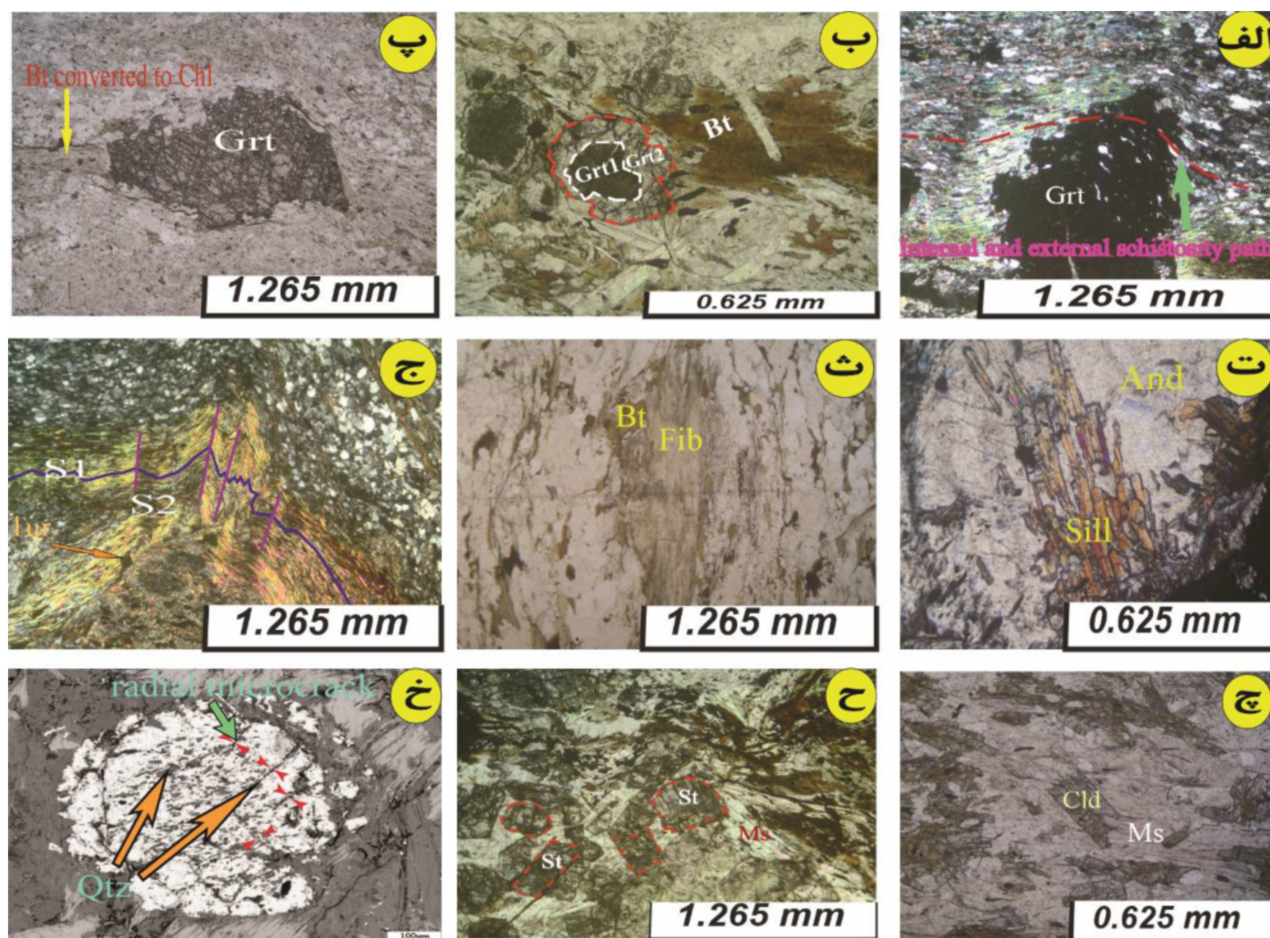
شکل ۲ الف) بودین که راستای کشش در آن مشخص شده است و ب) ریز چین‌ها که شیستوارگی‌های S_1 و S_2 در آن دیده می‌شوند.

سنگ‌نگاری

کانی‌های اصلی مجموعه دگرگونی در متاپلیت‌ها همه که شامل استارولیت، گارنت، آندالوزیت، سیلیمانیت و کلریتوئید و همه به صورت شکفته بلور هستند. کانی‌های بیوتیت، کلریت و مسکوویت نیز شیستوارگی را می‌سازند. همچنین کوارتز و کانی‌های کدر به همراه آن‌ها وجود دارند. گارنت دارای میانبار-هایی از بیوتیت، مسکوویت، کوارتز و کانی‌های کدر و گاهی شکستگی‌های بسیار لانه زنبوری و در مواردی نیز شکستگی‌های شعاعی و محیطی (شکل ۳ خ) است. گارنت کنار این ترک‌ها کلریتی شده است. این کانی روی شیستوارگی رشد کرده و آنرا قطع نموده است. میانبارهای موجود در شیستوارگی داخلی با شیستوارگی زمینه (شیستوارگی خارجی) همراستا هستند (شکل ۳ الف)، همچنین بافتی چون سایه فشاری که از نشانه‌های گارنت‌های همزمان با زمین‌ساخت است، در آن‌ها دیده نمی‌شود. بنابراین، بلورهای گارنت پسا زمین‌ساخت هستند (شکل‌های ۳ الف و پ). گارنت در دو مرحله رشد کرده است در مرحله نخست، شکل بلور گارنت منظم نیست (شکل ۳ ب) و میانبارهای بسیاری از کانی‌های کوارتز بی‌شکل و در اندازه‌های مختلف دارد (شکل ۳ خ)، اما در مرحله دوم، بدون میانبار و دارای شکل بلوری منظم‌تر است (شکل ۳ ب). آندالوزیت اغلب در سراسر مجموعه دگرگونی وجود دارد و سریسیتی شده است. در بخش‌های سالم این کانی، میانبارهایی از بیوتیت، مسکویت، استارولیت و سیلیمانیت منشوری و کانی‌های کدر دیده می‌شود. جهت میانبارهای بیوتیت در آندالوزیت با شیستوارگی خارجی همراستا هستند، بعبارت دیگر، آن‌ها نیز پسا زمین‌ساخت هستند. سیلیمانیت به دو صورت الیافی و منشوری دیده می‌شود. سیلیمانیت الیافی (فیبرولیت) از بیوتیت ناشی شده و سیلیمانیت منشوری از تبدیل چندشکلی آندالوزیت بوجود آمده و از لبه آندالوزیت به درون آن رشد کرده است (شکل ۳ ت). استارولیت در نور معمولی با چند رنگی زرد تا بی‌رنگ و برجستگی بالا شناخته می‌شود. استارولیت نیز به صورت متقاطع و دارای آرایش تصادفی است (شکل ۳ ح). کلریت بیشتر از بیوتیت بوجود آمده و یک کانی ثانوی است. کلریت به صورت کاذب جایگزین بیوتیت شده است. بلورهای مسکوویت اولیه موازی با شیستوارگی و بلورهای مسکوویت ثانوی دارای آرایش تصادفی هستند. کلریتوئید به موازی با شیستوارگی و در نور عادی دارای چند رنگی سبز مایل به آبی کم رنگ و دارای ماکل تکراری است. کوارتز دارای خاموشی موجی بوده و مرز بین دانه‌های آن خمیده و نامنظم است. بلورهای کوارتز در نقاط سه‌گانه زاویه ۱۲۰ درجه تشکیل نمی‌دهند، بنابراین انرژی سطحی کل در آن‌ها بالاست [۲۳]. پلاژیوکلازها با ماکل تکراری در برخی از انواع شیست‌ها دیده می‌شوند. تورمالین نیز روی شیستوارگی رشد کرده و آن را قطع می‌کند. شیستوارگی اولیه در اثر عامل تنشی دیگری دوباره دچار چین‌خوردگی شده است (شکل‌های ۲ب و ۳ ج). لایه‌بندی ترکیبی در شیست‌ها نشان می‌دهد که هر لایه در مقایسه با کوارتز از بیوتیت و مسکوویت غنی‌تر یا فقیرتر شده‌است (شکل ۳ ج).

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.3.2.6]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.3.557]

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.3.2.6]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.3.557]



شکل ۳ الف) مسیرهای شیستوارگی درونی گارنت و زمینه که همراستا هستند. ب) گارنت با دو مرحله رشد. پ) گارنت با شکستگی لانه زنبوری که بر شیستوارگی رشد کرده و پسا زمین ساخت است. ت) سیلیمانیت منشوری که از لبه به درون آندالوزیت رشد کرده است. ث) فیبرولیت که از بیوتیت ناشی شده است. ج) ریزچین‌ها (شیستوارگی‌های S_1 و S_2 بر آن‌ها نمایش داده شده‌اند). چ) کلریتوئید در زمینه‌ای از مسکوویت که شیستوارگی را ایجاد نموده است. ح) بلورهای استارولیت به طور متقاطع و تصادفی قرار گرفته‌اند و کنار آنها مسکوویت دیده می‌شود. خ) ریزترک‌های شعاعی و بلورهای کوارتز که در پهنه گارنت (نمونه MG_{39}) با هم در ارتباط‌اند. علائم بکار رفته برگرفته از مراجع [۱۹، ۲۰] است.

شیمی کانی

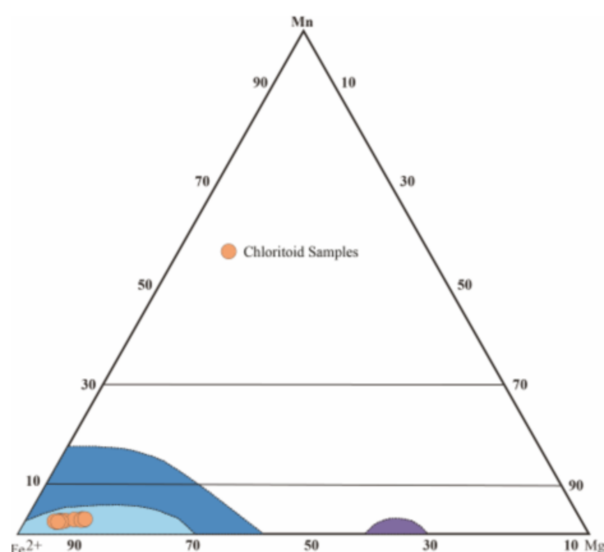
کانی‌های دگرگونی شامل کلریتوئید، گارنت، استارولیت، آندالوزیت، مسکویت و بیوتیت در نمونه‌های انتخاب شده از شیست‌ها با استفاده از ریز پردازشگر تجزیه شدند که نتایج به دست آمده در جدول‌های ۱ تا ۵ ارائه شده‌اند.

کلریتوئید

کلریتوئید یک کانی شاخص با درجه دگرگونی ناحیه‌ای پایین تا متوسط در سنگ‌های پلیتی است. نتایج تجزیه نقطه‌ای آن در جدول ۱ ارائه شده است. تعداد کاتیون‌ها براساس ۱۲ اکسیژن محاسبه شده‌اند. مقدار کل اکسیدها بین ۹۰٫۰۱۴ و ۹۳٫۰۱۳ درصد است که برای کلریتویید مقدار خوبی محسوب می‌شود. مقدار TiO_2 در کلریتوئید کمتر از ۰٫۲ wt% ($Ti = 0\text{-}0.004$ *apfu*) و مقدار CaO آن کمتر از ۰٫۰۴ wt% است که نشانگر نبود میانبارهای آپاتیت، اسفن و یا کربنات‌هاست. مقادیر Na_2O و K_2O ($Na \leq$ ۰٫۰۱۵ *apfu* و $K \leq$ ۰٫۰۰۳ *apfu*) نیز بسیار کم بوده که نشانگر نبود میانبارهای میکای پتاسیم‌دار و یا پاراگونیت است [۲۴]. مقدار Mn به ۰٫۰۵۸ *apfu* می‌رسد. شکل ۴ ترکیب کلریتوئیدها را بر نمودار مثلثی Fe^{2+}, Mn و Mg نشان می‌دهد. که براساس آن جایگاه مکعبی کلریتوئید توسط Fe^{2+} پر شده است [۲۵]، بعبارت دیگر، کلریتوئیدها از نوع آهن‌دار هستند.

جدول ۱ نتایج تجزیه نقطه‌ای کلریتوئید. تعداد کاتیون‌ها براساس ۱۲ اکسیژن محاسبه شده‌اند.

شماره نمونه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
SiO_2	۲۴٫۲۹۴	۲۳٫۴۶۶	۲۴٫۰۷۳	۲۴٫۵۵۳	۲۴٫۰۱۶	۲۴٫۳۶۵	۲۴٫۲۲۶	۲۳٫۶۷۲	۲۳٫۷۳۳	۲۳٫۸۱۰	۲۳٫۹۵۹	۲۴٫۰۰۸
TiO_2	۰٫۰۲۹	۰٫۰۳۷	۰٫۰۴۶	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۳۳	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰
Al_2O_3	۴۰٫۴۷۶	۳۹٫۵۲۳	۴۰٫۰۲۳	۴۰٫۷۴۵	۴۰٫۱۶۵	۴۰٫۱۶۶	۴۰٫۹۳۳	۳۹٫۸۵۶	۳۰۹٫۶۰۷	۴۰٫۰۷۰	۴۰٫۳۶۱	۴۰٫۴۹۵
FeO	۲۴٫۴۹۰	۲۵٫۴۴۹	۲۶٫۲۴۴	۲۶٫۰۰۴	۲۴٫۵۰۵	۲۵٫۲۲۳	۲۴٫۵۷۴	۲۵٫۲۸۰	۲۶٫۱۵۶	۲۶٫۳۸۱	۲۵٫۵۰۷	۲۴٫۷۲۷
MnO	۰٫۸۲۵	۰٫۶۶۶	۰٫۶۹۹	۰٫۷۱۲	۰٫۷۶۶	۰٫۸۰۵	۰٫۷۹۸	۰٫۷۳۶	۰٫۷۰۴	۰٫۶۶۲	۰٫۷۳۵	۰٫۸۳۷
MgO	۱٫۶۱۸	۰٫۸۹۱	۱٫۰۱۹	۰٫۹۵۷	۱٫۵۱۷	۱٫۳۴۰	۱٫۶۱۳	۱٫۰۸۰	۰٫۸۰۹	۰٫۸۹۶	۰٫۹۳۹	۱٫۵۴۵
CaO	۰٫۰۰۰	۰٫۰۲۹	۰٫۰۰۷	۰٫۰۱۶	۰٫۰۴۱	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۱۷	۰٫۰۰۰	۰٫۰۱۵	۰٫۰۰۲	۰٫۰۱۷
Na_2O	۰٫۰۴۲	۰٫۰۳۴	۰٫۰۱۳	۰٫۰۱۸	۰٫۰۹۳	۰٫۰۵۴	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۸	۰٫۰۳۷	۰٫۰۴۴	۰٫۰۱۱
K_2O	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۸	۰٫۰۲۶	۰٫۰۲۸	۰٫۰۰۰	۰٫۰۱۲	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۵	۰٫۰۳۰	۰٫۰۲۴
SrO	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۶۵	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰
BaO	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۰	۰٫۰۱۵	۰٫۰۶۸	۰٫۰۰۷	۰٫۰۴۶	۰٫۰۰۰	۰٫۰۱۷
Cr_2O_3	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۱۰	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۰	۰٫۰۲۱	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۰
NiO	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۰	۰٫۰۲۵	۰٫۰۴۴	۰٫۰۳۳	۰٫۰۱۳
مجموع	۹۱٫۷۸۱	۹۰٫۰۹۶	۹۲٫۱۲۷	۹۳٫۰۱۳	۹۱٫۱۹۷	۹۲٫۰۱۴	۹۲٫۱۷۷	۹۰٫۷۲۸	۹۱٫۰۴۹	۹۱٫۹۸۷	۹۱٫۶۱۷	۹۱٫۶۹۴
Si	۲٫۰۲۷	۲٫۰۱۰	۲٫۰۱۹	۲٫۰۳۳	۲٫۰۲۱	۲٫۰۳۶	۲٫۰۱۲	۲٫۰۱۲	۲٫۰۱۷	۲٫۰۰۵	۲٫۰۱۵	۲٫۰۱۰
$Al_{(iv)}$	۳٫۰۰۰	۳٫۰۰۰	۳٫۰۰۰	۳٫۰۰۰	۳٫۰۰۰	۳٫۰۰۰	۳٫۰۰۰	۳٫۰۰۰	۳٫۰۰۰	۳٫۰۰۰	۳٫۰۰۰	۳٫۰۰۰
$Al_{(vi)}$	۰٫۹۸۰	۰٫۹۹۰	۰٫۹۵۷	۰٫۹۷۵	۰٫۹۸۴	۰٫۹۵۵	۱٫۰۰۸	۰٫۹۹۲	۰٫۹۶۸	۰٫۹۷۸	۱٫۰۰۰	۰٫۹۹۶
Ti	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰
Fe^3+	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰
Mg	۰٫۲۰۱	۰٫۱۱۴	۰٫۱۲۷	۰٫۱۱۸	۰٫۱۹۰	۰٫۱۶۷	۰٫۲۰۰	۰٫۱۳۷	۰٫۱۰۲	۰٫۱۱۲	۰٫۱۱۸	۰٫۱۹۳
Fe^2+	۱٫۷۰۹	۱٫۸۲۳	۱٫۸۴۱	۱٫۸۰۰	۱٫۷۲۵	۱٫۷۶۲	۱٫۷۰۷	۱٫۷۹۷	۱٫۸۵۹	۱٫۸۵۸	۱٫۷۹۴	۱٫۷۳۱
Mn	۰٫۰۵۸	۰٫۰۴۸	۰٫۰۵۰	۰٫۰۵۰	۰٫۰۵۵	۰٫۰۵۷	۰٫۰۵۶	۰٫۰۵۳	۰٫۰۵۱	۰٫۰۴۷	۰٫۰۵۲	۰٫۰۵۹
Ca	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۴	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۲
Na	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۳	۰٫۰۱۵	۰٫۰۰۹	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۲
K	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۳



شکل ۴ نمودار مثلثی Mn-Fe2+-Mg که براساس ان، جایگاه مکعبی کلریتوئید توسط Fe2+ پر شده است.

گارنت

گارنت با فرمول کلی $X_3Y_2Z_3O_{12}$ شناخته می‌شود که کاتیون‌های جایگاه X شامل Mg، Ca، Mn^{2+} و Fe^{2+}، کاتیون-های جایگاه Y شامل Si، Mg، Fe^{3+}، Fe^{2+}، Cr، Al و Ti و کاتیون‌های جایگاه Z دربردارنده Si و Al هستند. در نمونه‌های متاپلیتی (MG_{31B} و MG_{39})، مجموع کاتیون‌ها در جایگاه X کمتر از ۳ *apfu* (۲٫۹۴> X > ۲٫۹۷) و مجموع کاتیون‌ها در جایگاه Y بیشتر از ۲ *apfu* (۲٫۰۲ > Y > ۲٫۰۵) است [۲۶]. بنابراین باید بین جایگاه‌های بلوری X و Y جانشینی‌هایی ساده وجود داشته باشد (جدول ۲). از آنجا که دو عضو پایانی اُوارُوایت و آندرادیت با گروسولار محلول جامد می‌سازند، این جانشینی‌ها به ترتیب به صورت $AlCr^{3+}{}_{-1}$ و $AlFe^{3+}{}_{-1}$ است. بنابراین گارنت در این نمونه‌ها غیر آرمانی است. با این وجود، مجموع کاتیون‌ها در هر دو جایگاه بلوری X و Y بسیار به مجموع کاتیون‌ها در فرمول عمومی نزدیک است، بعبارت دیگر، مقادیر اعضای پایانی اُوارُویت و آندرادیت ناچیز هستند.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.3.2.6]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.3.557]

بنابراین، گارنت در نمونه‌های جدول ۲ می‌تواند رفتاری شبیه به گارنت‌های آرمانی داشته باشد.

در جدول ۲ فرمول ساختاری گارنت براساس ۱۲ اکسیژن و ۸ کاتیون محاسبه شده است. ترکیب لبه به لبه برخی از گارنت‌ها در آن ارائه شده است. در گارنت نمونه MG_{31B}، از مرکز به سمت لبه، مقدار عضو پایانی آلماندین و گروسولار به ترتیب از ۸۲٫۱۰ تا ۸۴٫۶۸٪ و از ۲٫۷۷ تا ۳٫۵۲٪ افزایش یافته، در حالی که مقدار عضو پایانی اسپسارتین از ۵٫۷۳ به ۳٫۵۸٪ کاهش می‌یابد. اما در نمونه MG_{39} با دو نوع گارنت ۱ و ۲، است این مقادیر با تغییراتی همراه هستند. در مرکز گارنت نوع ۱، مقدار عضو پایانی آلماندین بین ۷۲٫۲۸ تا ۷۸٫۱۹٪ و در لبه آن از ۷۴٫۰۲ تا ۸۲٫۱۷٪ تغییر می‌کند، اما مقدار این عضو پایانی در لبه گارنت نوع ۲ به ۸۴٫۰۴٪ می‌رسد. افزون بر این، مقدار آلماندین در گارنت نوع ۱ از مرکز به لبه افزایش می‌یابد. مقدار عضو پایانی اسپسارتین نیز در مرکز گارنت نوع ۱ از ۱۰٫۶۷ تا ۱۳٫۵۲٪ و در لبه از ۶٫۶۵ تا ۱۲٫۴۵٪ تغییر می‌کند، به هر حال این مقدار از مرکز به لبه کاهش می‌یابد. این مقدار در لبه گارنت نوع ۲ به ۵٫۴۲٪ کاهش می‌یابد. مقدار عضو پایانی گروسولار در مرکز گارنت نوع ۱ از ۲٫۶۴ تا ۶٫۱۳٪ و در لبه از ۰٫۹۶ تا ۶٫۰۷٪ متغیر است، در نتیجه مقدار آن از مرکز به لبه کاهش می‌یابد، و در لبه گارنت نوع ۲ به ۱٫۴۳٪ می‌رسد.

جدول ۲ نتایج تجزیه نقطه‌ای گارنت و محاسبه فرمول ساختاری آن. محاسبات براساس ۸ کاتیون و ۱۲ آنیون ($X_3Y_2Z_3O_{12}$) بدون تهی‌جا در جایگاه‌های X یا Y انجام شده است. محاسبه نسبت‌های آهن سه ظرفیتی و دو ظرفیتی بر اساس موازنه بار است.

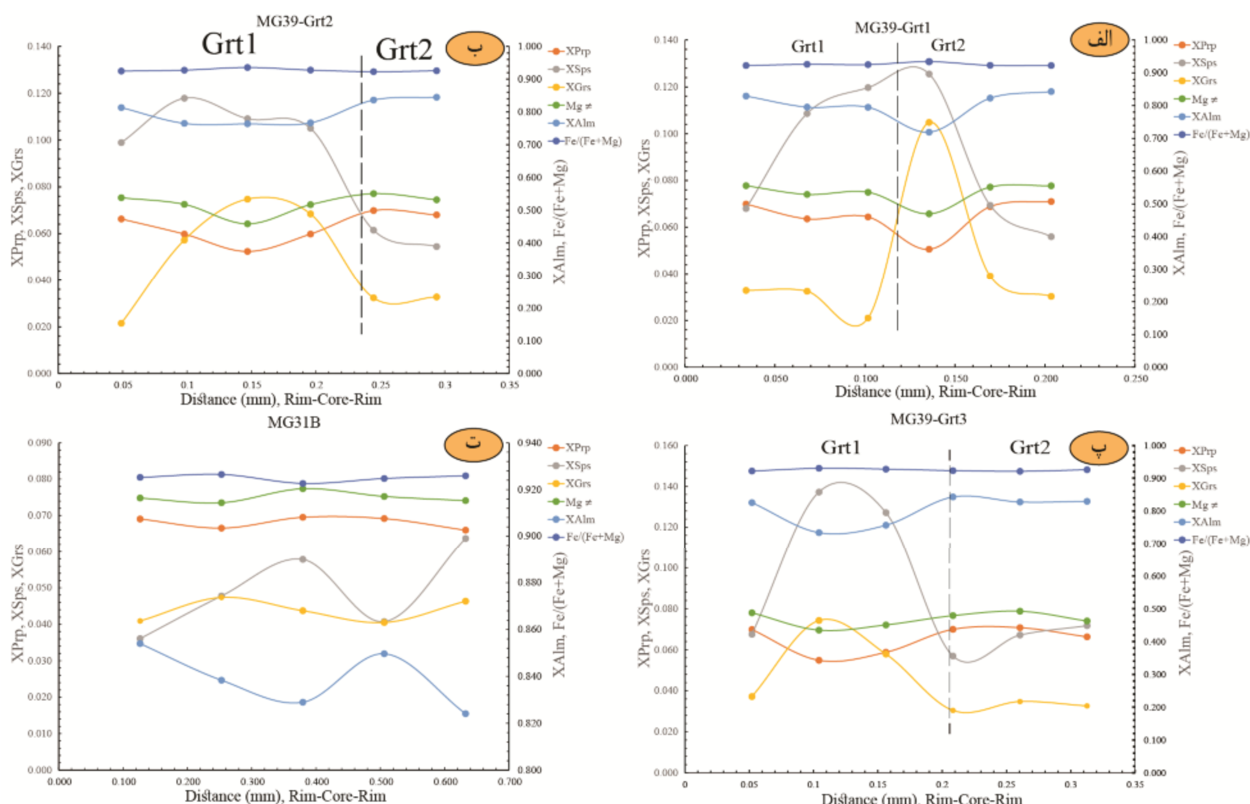
	MG31B					**MG39**																	
						Grt$_1$			Grt$_2$			Grt$_1$				Grt$_2$		Grt$_1$			Grt$_2$		
	Rim		core		Rim	rim	core	rim			rim	rim	core		rim		rim	rim	core	rim			rim
شماره نمونه	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷	۲۸	۲۹	۳۰	۳۱	۳۲	۳۳	۳۴	۳۵	۳۶
SiO_2	۳۶٫۶۴۵	۳۶٫۲۶۳	۳۶٫۲۸۰	۳۶٫۴۷۲	۳۶٫۰۰۴	۳۶٫۹۴۳	۳۶٫۱۶۶	۳۶٫۲۱۵	۳۶٫۱۴۰	۳۶٫۷۵۰	۳۶٫۱۱۹	۳۵٫۸۱۹	۳۶٫۱۶۵	۳۵٫۹۰۱	۳۶٫۷۳۱	۳۶٫۲۱۳	۳۶٫۱۸۷	۳۶٫۱۷۹	۳۶٫۱۱۰	۳۶٫۰۷۱	۳۶٫۸۲۸	۳۵٫۸۴۰	۳۵٫۸۳۵
TiO_2	۰٫۰۲۴	۰٫۰۵۵	۰٫۱۴۹	۰٫۲۴۰	۰٫۰۶۸	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۵۶	۰٫۰۵۱	۰٫۰۱۸	۰٫۰۰۰	۰٫۰۴۹	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۲۱۹	۰٫۰۱۴	۰٫۰۴۶	۰٫۰۰۰	۰٫۰۳۰	۰٫۰۱۹	۰٫۰۳۸
Al_2O_3	۲۰٫۹۰۵	۲۰٫۶۶۲	۲۰٫۶۵۴	۲۰٫۸۷۰	۲۰٫۳۹۹	۲۱٫۲۷۵	۲۰٫۸۷۰	۲۰٫۷۱۳	۲۰٫۶۱۳	۲۰٫۵۲۶	۲۰٫۷۸۶	۲۰٫۶۴۹	۲۰٫۸۰۸	۲۰٫۶۷۸	۲۱٫۰۷۶	۲۰٫۸۷۷	۲۰٫۶۷۳	۲۰٫۷۰۵	۲۰٫۶۳۹	۲۰٫۸۸۲	۲۱٫۰۹۰	۲۰٫۴۳۹	۲۰٫۴۹۸
Cr_2O_3	۰٫۰۶۳	۰٫۰۹۷	۰٫۰۰۰	۰٫۰۹۲	۰٫۱۲۵	۰٫۰۴۲	۰٫۰۱۸	۰٫۰۱۸	۰٫۰۱۴	۰٫۰۵۱	۰٫۰۰۲	۰٫۰۴۰	۰٫۰۱۶	۰٫۰۱۲	۰٫۰۰۰	۰٫۰۳۲	۰٫۰۰۷	۰٫۰۴۱	۰٫۰۰۰	۰٫۰۱۱	۰٫۰۱۹	۰٫۰۰۷	۰٫۰۱۲
FeO	۳۸٫۱۳۷	۳۷٫۹۲۴	۳۷٫۰۹۳	۳۷٫۹۹۶	۳۷٫۳۹۲	۳۷٫۱۴۱	۳۵٫۷۷۶	۳۵٫۸۱۰	۳۲٫۸۶۸	۳۶٫۹۵۸	۳۷٫۱۷۱	۳۶٫۲۳۶	۳۵٫۱۶۸	۳۴٫۴۴۸	۳۴٫۹۱۰	۴۳۰۳۷	۳۷٫۱۶۱	۳۷٫۱۵۸	۳۳٫۱۵۴	۳۴٫۴۱۹	۳۷٫۶۱۶	۳۷٫۰۹۷	۳۷٫۳۳۲
MnO	۱٫۵۶۱	۲٫۰۴۷	۲٫۴۸۴	۱٫۷۶۳	۲٫۷۱۰	۲٫۹۶۷	۴٫۶۳۶	۵٫۱۱۷	۵٫۳۵۶	۲٫۹۳۴	۲٫۳۸۹	۴٫۱۸۴	۵٫۰۳۳	۴٫۶۳۰	۴٫۵۵۴	۲٫۶۲۸	۲٫۳۳۸	۲٫۸۸۶	۵٫۸۵۶	۵٫۴۱۵	۲٫۴۷۸	۲٫۸۴۳	۳٫۰۳۷
MgO	۱٫۶۹۸	۱٫۶۲۰	۱٫۶۹۷	۱٫۷۰۰	۱٫۵۹۵	۱٫۷۳۳	۱٫۵۴۳	۱٫۵۶۵	۱٫۲۲۷	۱٫۶۵۲	۱٫۷۲۳	۱٫۵۹۳	۱٫۴۵۱	۱٫۲۶۳	۱٫۴۷۴	۱٫۶۹۷	۱٫۶۵۸	۱٫۶۹۶	۱٫۳۳۰	۱٫۴۲۲	۱٫۷۲۹	۱٫۷۰۲	۱٫۵۹۵
CaO	۱٫۴۰۰	۱٫۶۰۵	۱٫۴۸۵	۱٫۳۸۵	۱٫۵۵۹	۱٫۱۳۲	۱٫۰۹۶	۰٫۷۱۰	۳٫۵۳۶	۱٫۳۰۷	۱٫۰۲۲	۰٫۷۱۸	۱٫۹۳۳	۲٫۵۰۷	۲٫۳۴۶	۱٫۰۹۳	۱٫۱۱۰	۱٫۲۵۶	۲٫۵۰۶	۱٫۹۴۹	۱٫۰۴۶	۱٫۱۶۳	۱٫۰۹۱
Si	۲٫۹۷۰	۲٫۹۵۰	۲٫۹۶۰	۲٫۹۶۰	۲٫۹۴۰	۲٫۹۷۰	۲٫۹۵۰	۲٫۹۶۰	۲٫۹۵۰	۰٫۹۴۰	۲٫۹۷۰	۲٫۹۵۰	۲٫۹۳۰	۲٫۹۴۰	۲٫۹۶۰	۲٫۹۵۰	۲٫۹۷۰	۲٫۹۵۰	۲٫۹۵۰	۲٫۹۴۰	۲٫۹۸۰	۲٫۹۵۰	۲٫۹۴۰
Ti	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۱۰	۰٫۰۱۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۱۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰
Al(iv)	۰٫۰۳۰	۰٫۰۵۰	۰٫۰۴۰	۰٫۰۴۰	۰٫۰۶۰	۰٫۰۳۰	۰٫۰۵۰	۰٫۰۴۰	۰٫۰۵۰	۰٫۰۶۰	۰٫۰۳۰	۰٫۰۵۰	۰٫۰۷۰	۰٫۰۶۰	۰٫۰۴۰	۰٫۰۵۰	۰٫۰۳۰	۰٫۰۵۰	۰٫۰۵۰	۰٫۰۶۰	۰٫۰۲۰	٫۰۵۰	۰٫۰۶۰
Al(vi)	۱٫۹۷۰	۱٫۹۳۰	۱٫۹۵۰	۱٫۹۵۰	۱٫۹۱۰	۱٫۹۹۰	۱٫۹۶۰	۱٫۹۵۰	۱٫۹۳۰	۱٫۹۳۰	۱٫۹۸۰	۱٫۹۵۰	۱٫۹۲۰	۱٫۹۴۰	۱٫۹۶۰	۱٫۹۶۰	۱٫۹۷۰	۱٫۹۴۰	۱٫۹۴۰	۱٫۹۴۰	۱٫۹۹۰	۱٫۹۳۰	۱٫۹۳۰
Cr	۰٫۰۰۰	۰٫۰۱۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۱۰	۰٫۰۱۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰
Fe^{2+}	۲٫۵۴۰	۲٫۴۸۰	۲٫۴۶۰	۲٫۵۳۰	۲٫۴۳۰	۲٫۴۶۰	۲٫۳۵۰	۲٫۳۵۰	۲٫۱۲۰	۲٫۴۲۰	۲٫۵۰۰	۲٫۴۰۰	۲٫۲۴۰	۲٫۲۵۰	۲٫۲۷۰	۲٫۴۷۰	۲٫۵۲۰	۲٫۴۴۰	۲٫۱۷۰	۲٫۲۲۰	۲٫۵۱۰	۲٫۴۴۰	۲٫۴۴۰
Fe^{3+}	۰٫۰۵۰	۰٫۰۱۰	۰٫۰۷۰	۰٫۰۵۰	۰٫۱۳۰	۰٫۰۳۰	۰٫۰۹۰	۰٫۰۹۰	۰٫۱۲۰	۰٫۱۲۰	۰٫۰۵۰	۰٫۱۰۰	۰٫۱۴۰	۰٫۱۱۰	۰٫۰۸۰	۰٫۰۸۰	۰٫۰۳۰	۰٫۱۰۰	۰٫۱۰۰	۰٫۱۲۰	۰٫۰۳۰	۰٫۱۱۰	۰٫۱۲۰
Mn^{2+}	۰٫۱۱۰	۰٫۱۴۰	۰٫۱۷۰	۰٫۱۲۰	۰٫۱۹۰	۰٫۲۰۰	۰٫۳۲۰	۰٫۳۵۰	۰٫۳۷۰	۰٫۲۰۰	۰٫۱۷۰	۰٫۲۹۰	۰٫۳۵۰	۰٫۳۲۰	۰٫۳۱۰	۰٫۱۸۰	۰٫۱۶۰	۰٫۲۰۰	۰٫۴۱۰	۰٫۳۷۰	۰٫۱۷۰	۰٫۲۰۰	۰٫۲۱۰
Mg	۰٫۲۱۰	۰٫۲۰۰	۰٫۲۱۰	۰٫۲۱۰	۰٫۱۹۰	۰٫۲۱۰	۰٫۱۹۰	۰٫۱۹۰	۰٫۱۵۰	۰٫۲۰۰	۰٫۲۱۰	۰٫۲۰۰	۰٫۱۸۰	۰٫۱۵۰	۰٫۱۸۰	۰٫۲۱۰	۰٫۲۰۰	۰٫۲۱۰	۰٫۱۶۰	۰٫۱۷۰	۰٫۲۱۰	۰٫۲۱۰	۰٫۲۰۰
Ca	۰٫۱۲۰	۰٫۱۴۰	۰٫۱۳۰	۰٫۱۲۰	۰٫۱۴۰	۰٫۱۰۰	۰٫۱۰۰	۰٫۰۶۰	۰٫۳۱۰	۰٫۱۲۰	۰٫۰۹۰	۰٫۰۶۰	۰٫۱۷۰	۰٫۲۲۰	۰٫۲۰۰	۰٫۱۰۰	۰٫۱۰۰	۰٫۱۱۰	۰٫۲۲۰	۰٫۱۷۰	۰٫۰۹۰	۰٫۱۰۰	۰٫۱۰۰
اووارویت	۰٫۲۰٪	۰٫۳۱٪	--	۰٫۳۰٪	۰٫۴۰٪	۰٫۱۳٪	۰٫۰۶٪	۰٫۰۶٪	۰٫۰۵٪	۰٫۱۷٪	۰٫۰۱٪	۰٫۱۳٪	۰٫۰۵٪	۰٫۰۴٪	--	۰٫۱۰٪	۰٫۰۲٪	۰٫۱۳٪	--	۰٫۰۴٪	۰٫۰۶٫۰۶٪	۰٫۰۲٪	۰٫۰۴٪
اسپسارتین	۳٫۵۸٪	۴٫۷۰٪	۵٫۷۳٪	۴٫۰۴٪	۶٫۲۶٪	۶٫۷۴٪	۱۰٫۶۷٪	۱۱٫۷۹٪	۱۲٫۳۳٪	۶٫۸۱٪	۵٫۵۴٪	۹٫۷۲٪	۱۱٫۵۳٪	۱۰٫۷۱٪	۱۰٫۳۵٪	۶٫۰۵٪	۵٫۴۲٪	۶٫۶۵٪	۱۳٫۵۲٪	۱۲٫۴۵٪	۵٫۶۵٪	۶٫۶۱٪	۷٫۰۴٪
پیروپ	۶٫۸۵٪	۶٫۵۵٪	۶٫۸۹٪	۶٫۸۵٪	۶٫۴۸٪	۶٫۹۳٪	۶٫۲۵٪	۶٫۳۵٪	۴٫۹۷٪	۶٫۷۵٪	۷٫۰۳٪	۶٫۵۲٪	۵٫۸۵٪	۵٫۱۴٪	۵٫۹۰٪	۶٫۸۸٪	۶٫۷۶٪	۶٫۸۸٪	۵٫۴۰٪	۵٫۷۵٪	۶٫۹۴٪	۶٫۹۶٪	۶٫۵۱٪
آلماندین	۸۴٫۶۸٪	۸۲٫۵۵٪	۸۲٫۱۰٪	۸۴٫۲۱٪	۸۱٫۰۰٪	۸۲٫۱۷٪	۷۸٫۱۹٪	۷۸٫۳۲٪	۷۰٫۶۵٪	۸۰٫۷۱٪	۸۳٫۴۰٪	۷۹٫۹۶٪	۷۴٫۸۲٪	۷۴٫۹۸٪	۷۵٫۶۰٪	۸۲٫۳۵٪	۸۴٫۰۴٪	۸۱٫۲۷٪	۷۲٫۲۸٪	۷۴٫۰۲٪	۸۳٫۶۶٪	۸۱٫۴۱٪	۸۱٫۴۶٪
گروسولار	۳٫۵۲٪	۲٫۸۰٪	۲٫۷۷٪	۲٫۶۱٪	۱٫۸۱٪	۳٫۱۲٪	۲٫۶۴٪	۰٫۹۶٪	۸۰٫۵۰٪	۲٫۱۹٪	۲٫۸۳٪	۱٫۳۷٪	۳٫۹۸٪	۶٫۱۳٪	۶٫۰۷٪	۲٫۷۷٪	۲٫۳۴٪	۲٫۴۳٪	۵٫۹۱٪	۴٫۷۸٪	۲٫۸۷٪	۱٫۷۳٪	۱٫۴۳٪
آندرادیت	۰٫۲۷٪	۱٫۳۸٪	۱٫۱۰٪	۰٫۳۷٪	۲٫۱۳٪	--	۰٫۴۹٪	۱٫۰۶٪	۱٫۷۶٪	۱٫۳۱٪	--	۰٫۵۶٪	۱٫۵۷٪	۱٫۰۱٪	۰٫۶۷٪	۰٫۳۱٪	۰٫۲۲٪	۱٫۰۶٪	۱٫۲۷٪	۰٫۸۵٪	--	۱٫۶۱٪	۱٫۶۱٪
الکورلومیت	۰٫۰۷٪	۰٫۱۷٪	۰٫۴۶٪	۰٫۷۳٪	۰٫۲۱٪	--	--	--	--	۰٫۱۷٪	۰٫۱۶٪	۰٫۰۶٪	--	۰٫۱۵٪	--	--	۰٫۶۸٪	۰٫۰۴٪	۰٫۱۴٪	--	۰٫۰۹٪	۰٫۰۶٪	۰٫۱۲٪
XPrp	۰٫۰۶۹	۰٫۰۶۷	۰٫۰۷۰	۰٫۰۶۹	۰٫۰۶۶	۰٫۰۷۰	۰٫۰۶۴	۰٫۰۶۴	۰٫۰۵۱	۰٫۰۶۹	۰٫۰۷۱	۰٫۰۶۶	۰٫۰۶۰	۰٫۰۵۲	۰٫۰۶۰	٫۰۷۰	۰٫۰۶۸	۰٫۰۷۰	۰٫۰۵۵	۰٫۰۵۹	۰٫۰۷۰	۰٫۰۷۱	۰٫۰۶۶
XSps	۰٫۰۳۶	۰٫۰۴۸	۰٫۰۵۸	۰٫۰۴۱	۰٫۰۶۴	۰٫۰۶۸	۰٫۱۰۹	۰٫۱۲۰	۰٫۱۲۶	۰٫۰۶۹	۰٫۰۵۶	۰٫۰۹۹	۰٫۱۱۸	۰٫۱۰۹	۰٫۱۰۵	۰٫۰۶۱	۰٫۰۵۴	۰٫۰۶۸	۰٫۱۳۷	۰٫۱۲۷	۰٫۰۵۸	۰٫۰۶۷	۰٫۰۷۲
XGrs	۰٫۰۴۱	۰٫۰۴۷	۰٫۰۴۴	۰٫۰۴۰	۰٫۰۴۶	۰٫۰۳۳	۰٫۰۳۲	۰٫۰۲۱	۰٫۱۰۵	۰٫۰۳۹	۰٫۰۳۰	۰٫۰۲۱	۰٫۰۵۷	۰٫۰۷۵	۰٫۰۶۸	۰٫۰۳۲	۰٫۰۳۳	۰٫۰۳۷	۰٫۰۷۴	۰٫۰۵۸	۰٫۰۳۰	۰٫۰۳۵	۰٫۰۳۳
XFe	۰٫۹۲۵	۰٫۹۲۶	۰٫۹۲۳	۰٫۹۲۵	۰٫۹۲۶	۰٫۹۲۲	۰٫۹۲۶	۰٫۹۲۵	۰٫۹۳۴	۰٫۹۲۳	۰٫۹۲۲	۰٫۹۲۵	۰٫۹۲۷	۰٫۹۳۶	۰٫۹۲۸	۰٫۹۲۳	۰٫۹۲۶	۰٫۹۲۲	۰٫۹۳۰	۰٫۹۲۸	۰٫۹۲۳	۰٫۹۲۱	۰٫۹۲۶
Mg ≠	۰٫۰۷۵	۰٫۰۷۴	۰٫۰۷۷	۰٫۰۷۵	۰٫۰۷۴	۰٫۰۷۸	۰٫۰۷۴	۰٫۰۷۵	۰٫۰۶۶	۰٫۰۷۷	۰٫۰۷۸	۰٫۰۷۵	۰٫۰۷۳	۰٫۰۶۴	۰٫۰۷۲	۰٫۰۷۷	۰٫۰۷۴	۰٫۰۷۸	۰٫۰۷۰	۰٫۰۷۲	۰٫۰۷۷	۰٫۰۷۹	۰٫۰۷۴
غیرآرمانی	Non-ideal	Non-ideal	Non-ideal	Non-ideal	Non-ideal	Non-ideal	Non-ideal	Non-ideal	Non-ideal	Non-ideal	Non-ideal	Non-ideal	Non-ideal	Non-ideal	Non-ideal	Non-ideal	Non-ideal	Non-ideal	Non-ideal	Non-ideal	Non-ideal	Non-ideal	Non-ideal

منطقه‌بندی شیمیایی در نمونه‌های گارنت MG_{31B} و MG_{39} در شکل ۵ نشان داده شده است. چنان که دیده می‌شود، در نمونه MG_{31B} گارنت منطقه‌بندی بسیار شدیدی دیده نمی‌شود. از مرکز به سوی لبه، اسپسارتین کاهش می‌یابد، حال آنکه آلماندین افزایش می‌یابد، اما پیروپ، گروسولار و Fe/(Fe+Mg) به نسبت بدون منطقه‌بندی هستند. این واقعیت که Fe/(Fe+Mg) منطقه‌بندی شدید ندارد نشان می‌دهد که تغییرات دما طی رشد گارنت کم بوده است [۲۷، ۲۸]. منطقه‌بندی در این گارنت‌ها مانند منطقه‌بندی در گارنت‌های نیوهامپشایر در ایالات متحده آمریکا است [۲۹].

منطقه بندی شیمیایی در MG_{39} با تغییراتی همراه است به طوری که با وجود یک منطقه بندی شیمیایی عادی در گارنت نوع ۱، از مرکز به لبه کسرهای مولی اسپسارتین و گروسولار کاهش و کسرهای مولی آلماندین و پیروپ افزایش یافته و X_{Fe} بدون تغییر است البته این روند ادامه نیافته، بلکه در سطحی تقریباً ثابت معادل لبه گارنت نوع ۱ ادامه یافته است و اغلب روندی موازی هم دارند. گارنت ۱ سرشار از میانبارهای کوارتز بی‌شکل است که نشان می‌دهند که این بخش از گارنت به احتمال بسیار برای رسیدن به تعادل سریع‌تر رشد کرده است. این موضوع با نیم‌رخ مسطح Ca و Mg در مرکز گارنت ۱ همخوانی دارد و نشان دهنده رشد در دما و فشار محدود است [۳۰]. شکل ۵ پ رشد گارنت ۲ را بهتر نشان می‌دهد، به طوری که مرکز گارنت ۲ با مقدار بسیار کم اسپسارتین (۵٫۶۵٪؛ جدول ۲) پشتیبانی می‌شود [۳۰].

بیوتیت‌های کلریتی شده

نتایج تجزیه نقطه‌ای ترکیب شیمیایی بیوتیت‌های کلریتی شده در جدول ۳ ارائه شده‌اند. چنان که دیده می‌شود، مجموع کل اکسیدها (بدون درنظر گرفتن آب) کمتر از ۹۶-۹۵ درصد و مقدار K_2O نیز کمتر از ۸ درصد است. مجموع کل اکسیدهای موجود در کلریت به جز آب حدود ۸۹ درصد است. پس، این داده‌ها نشان می‌دهند که بیوتیت‌ها کلریتی شده‌اند. از این رو، شیمی کلریت با استفاده از نرم افزار WinCcac [۱۷] بر پایه ۱۴ اکسیژن رده‌بندی و تحلیل شد (جدول ۳).



شکل ۵ الف تا پ) نیم‌رخ گارنت در نمونه MG_{39}، ت) نیم‌رخ گارنت در نمونه MG_{31B}.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.3.2.6]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.3.557]

جدول ۳ نتایج داده‌های تجزیه نقطه‌ای بیوتیت‌های کلریتی شده و تعیین فرمول واحد ساختاری به همراه طبقه‌بندی و تعیین شرایط دمایی آن‌ها.

شماره نمونه	۲۸	۲۹	۳۰	۳۱	۳۲	۵۳	۵۵	۵۶	۵۷	۵۸	۵۹	۶۰	۶۲	۶۳
(%)SiO_2	۲۸٫۵۸۴	۲۵٫۹۶۸	۲۷٫۵۴۵	۲۷٫۷۲۱	۳۱٫۰۷۶	۳۰٫۰۷۸	۲۷٫۱۸۴	۲۸٫۸۲۵	۲۸٫۲۱۳	۳۰٫۳۸۹	۲۵٫۲۴۳	۲۵٫۷۵۵	۲۸٫۷۴۵	۲۷٫۲۵۳
TiO_2	۰٫۹۱۸	۰٫۳۳۵	۲٫۱۵۴	۰٫۷۸۹	۱٫۳۰۴	۱٫۵۸۶	۱٫۰۳۹	۱٫۳۳۴	۱٫۷۷۷	۱٫۵۷۱	۰٫۶۸۷	۰٫۸۰۹	۱٫۴۱۳	۰٫۹۲۷
Al_2O_3	۲۱٫۰۹۱	۲۱٫۲۸۵	۱۹٫۵۱۸	۱۸٫۶۰۰	۱۹٫۳۲۶	۲۰٫۲۷۱	۲۰٫۸۰۹	۲۰٫۰۴۳	۲۰٫۳۴۵	۱۹٫۹۱۲	۲۱٫۵۳۷	۲۱٫۰۵۷	۲۰٫۲۵۱	۲۰٫۴۴۲
FeO	۲۷٫۴۳۷	۳۰٫۷۶۶	۲۹٫۹۴۸	۳۰٫۵۹۷	۲۷٫۱۹۵	۲۵٫۸۸۰	۲۵٫۲۴۶	۲۶٫۶۳۹	۲۶٫۶۲۷	۲۵٫۹۹۷	۲۹٫۰۸۵	۲۸٫۲۹۴	۲۵٫۵۴۰	۲۷٫۵۰۸
MnO	۰٫۰۳۸	۰٫۱۰۶	۰٫۱۲۸	۰٫۰۵۷	۰٫۱۰۸	۰٫۱۲۰	۰٫۱۱۱	۰٫۰۸۳	۰٫۱۰۳	۰٫۰۸۸	۰٫۱۲۰	۰٫۱۲۲	۰٫۱۲۶	۰٫۱۶۳
NiO	۰٫۰۸۲	۰٫۰۳۸	۰٫۰۳۵	۰٫۰۳۴	۰٫۰۴۲	۰٫۰۰۰	۰٫۰۳۵	۰٫۰۶۴	۰٫۰۴۲	۰٫۰۴۱	۰٫۰۴۸	۰٫۰۰۴	۰٫۰۵۳	۰٫۰۷۰
MgO	۶٫۶۶۴	۷٫۲۲۹	۶٫۶۵۸	۶٫۱۵۶	۶٫۱۶۹	۷٫۶۷۴	۸٫۸۱۷	۸٫۱۱۶	۸٫۰۹۹	۷٫۶۳۹	۹٫۵۵۴	۹٫۲۶۳	۸٫۱۳۹	۸٫۴۲۴
CaO	۰٫۰۴۷	۰٫۰۷۴	۰٫۰۳۲	۰٫۲۶۵	۰٫۰۵۷	۰٫۰۴۰	۰٫۰۱۸	۰٫۰۶۲	۰٫۰۲۱	۰٫۰۰۹	۰٫۰۰۸	۰٫۰۶۱	۰٫۱۴۰	۰٫۰۶۶
Na_2O	۰٫۰۷۴	۰٫۰۸۸	۰٫۰۷۶	۰٫۱۷۸	۰٫۰۸۴	۰٫۲۱۳	۰٫۰۹۷	۰٫۱۴۴	۰٫۱۰۵	۰٫۱۶۱	۰٫۰۱۷	۰٫۱۱۲	۰٫۱۹۴	۰٫۱۸۲
K_2O	۲٫۴۲۲	۰٫۳۷۸	۲٫۵۸۰	۲٫۳۰۵	۵٫۶۳۳	۳٫۹۸۵	۲٫۰۸۳	۳٫۱۶۲	۲٫۹۶۶	۴٫۱۳۷	۰٫۹۶۵	۱٫۲۳۰	۲٫۶۲۸	۱٫۹۹۰
F	۰٫۲۹۱	۰٫۰۱۹	۰٫۲۳۲	۰٫۰۷۶	۰٫۲۶۰	۰٫۱۴۱	۰٫۴۰۶	۰٫۳۷۵	۰٫۳۱۷	۰٫۴۰۱	۰٫۰۰۰	۰٫۱۵۴	۰٫۱۳۹	۰٫۱۱۷
Cl	۰٫۰۲۰	۰٫۰۰۴	۰٫۰۱۷	۰٫۰۱۰	۰٫۰۴۹	۰٫۰۲۵	۰٫۰۳۴	۰٫۰۴۷	۰٫۰۲۹	۰٫۰۴۵	۰٫۰۱۷	۰٫۰۲۵	۰٫۰۳۶	۰٫۰۵۱
O=F	۰٫۱۲۳	۰٫۰۰۸	۰٫۰۹۸	۰٫۰۳۲	۰٫۱۱۰	۰٫۰۵۹	۰٫۱۷۱	۰٫۱۵۸	۰٫۱۳۴	۰٫۱۶۹	۰٫۰۰۰	۰٫۰۶۵	۰٫۰۵۹	۰٫۰۴۹
O=Cl	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۴	۰٫۰۰۲	۰٫۰۱۱	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۸	۰٫۰۱۱	۰٫۰۰۷	۰٫۰۱۰	۰٫۰۰۴	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۸	۰٫۰۱۲
(%)مجموع	۸۷٫۵۴۱	۸۶٫۲۸۱	۸۸٫۸۲۲	۸۶٫۷۵۴	۹۱٫۱۸۳	۸۹٫۹۴۸	۸۸٫۷۰۰	۸۸٫۷۲۶	۸۸٫۵۰۴	۹۰٫۲۱۱	۸۷٫۲۷۷	۸۶٫۸۱۶	۸۷٫۳۳۷	۸۷٫۱۳۲
[H2O(c)	۱۱٫۰۳۰	۱۰٫۸۷۸	۱۰٫۹۹۴	۱۰٫۷۷۹	۱۱٫۳۴۸	۱۱٫۴۳۵	۱۱٫۰۲۲	۱۱٫۰۹۸	۱۱٫۱۰۸	۱۱٫۳۰۶	۱۱٫۰۴۲	۱۰٫۹۲۷	۱۱٫۱۵۲	۱۱٫۰۰۸
FeO(c)](%)	۲۷٫۴۳۷	۳۰٫۷۶۶	۲۹٫۹۴۸	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
(apfu)[Si	۳٫۰۶۷	۲٫۸۶۰	۲٫۹۷۳	۳٫۰۷۳	۳٫۲۴۵	۳٫۱۳۴	۲٫۹۰۴	۳٫۰۶۲	۳٫۰۰۳	۳٫۱۶۶	۲٫۷۴۱	۲٫۸۰۶	۳٫۰۷۰	۲٫۹۵۱
Ti	۰٫۰۷۴	۰٫۰۲۸	۰٫۱۷۵	۰٫۰۶۶	۰٫۱۰۲	۰٫۱۲۴	۰٫۰۸۴	۰٫۱۰۷	۰٫۱۴۲	۰٫۱۲۳	۰٫۰۵۶	۰٫۰۶۶	۰٫۱۱۴	۰٫۰۷۶
Al	۲٫۶۶۷	۲٫۷۶۳	۲٫۴۸۳	۲٫۴۳۰	۲٫۳۷۸	۲٫۴۹۰	۲٫۶۲۰	۲٫۵۰۹	۲٫۵۵۲	۲٫۴۴۵	۲٫۷۵۶	۲٫۷۰۴	۲٫۵۴۹	۲٫۶۰۸
Fe(2+)	۲٫۴۶۲	۲٫۸۳۴	۲٫۷۰۴	۲٫۸۳۷	۲٫۳۷۵	۲٫۲۵۵	۲٫۵۲۴	۲٫۳۶۶	۲٫۳۷۰	۲٫۲۶۵	۲٫۶۴۱	۲٫۵۷۸	۲٫۲۸۱	۲٫۴۹۱
Mn	۰٫۰۰۴	۰٫۰۱۰	۰٫۰۱۲	۰٫۰۰۵	۰٫۰۱۰	۰٫۰۱۱	۰٫۰۱۰	۰٫۰۰۸	۰٫۰۰۹	۰٫۰۰۸	۰٫۰۱۱	۰٫۰۱۱	۰٫۰۱۱	۰٫۰۱۵
Ni	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۴	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۴	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۴	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۶
Mg	۱٫۰۶۶	۱٫۱۸۷	۱٫۰۷۱	۱٫۰۱۷	۰٫۹۶۰	۱٫۱۹۲	۱٫۴۰۴	۱٫۲۸۵	۱٫۲۸۵	۱٫۱۸۶	۱٫۵۴۶	۱٫۵۰۵	۱٫۲۹۶	۱٫۳۶۰
Ca	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۹	۰٫۰۰۴	۰٫۰۳۲	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۷	۰٫۰۱۶	۰٫۰۰۸
Na	۰٫۰۱۵	۰٫۰۱۹	۰٫۰۱۶	۰٫۰۳۸	۰٫۰۱۷	۰٫۰۴۳	۰٫۰۲۰	۰٫۰۳۰	۰٫۰۲۲	۰٫۰۳۳	۰٫۰۰۴	۰٫۰۲۴	۰٫۰۴۰	۰٫۰۳۸
K	۰٫۳۳۲	۰٫۰۵۳	۰٫۳۵۵	۰٫۳۲۶	۰٫۷۵۰	۰٫۵۳۰	۰٫۲۸۴	۰٫۴۲۸	۰٫۴۰۳	۰٫۵۵۰	۰٫۱۳۴	۰٫۱۷۱	۰٫۳۵۸	۰٫۲۷۵
F	۰٫۱۰۲	۰٫۰۰۷	۰٫۰۸۱	۰٫۰۲۷	۰٫۰۸۷	۰٫۰۴۸	۰٫۱۳۹	۰٫۱۲۹	۰٫۱۰۹	۰٫۱۳۵	۰٫۰۰۰	۰٫۰۵۴	۰٫۰۴۸	۰٫۰۴۱
Cl	۰٫۰۰۴	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۹	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۹	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۸	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۷	۰٫۰۱۰
OH](apfu)	۷٫۸۹۴	۷٫۹۹۳	۷٫۹۱۶	۷٫۹۷۱	۷٫۹۰۴	۷٫۹۴۸	۷٫۸۵۵	۷٫۸۶۳	۷٫۸۸۶	۷٫۸۵۷	۷٫۹۹۷	۷٫۹۴۲	۷٫۹۴۵	۷٫۹۵۰
[Si	۳٫۰۶۷	۲٫۸۶۰	۲٫۹۷۳	۳٫۰۷۳	۳٫۲۴۵	۳٫۱۳۴	۲٫۹۰۴	۳٫۰۶۲	۳٫۰۰۳	۳٫۱۶۶	۲٫۷۴۱	۲٫۸۰۶	۳٫۰۷۰	۲٫۹۵۱
Al(IV)	۰٫۹۳۳	۱٫۱۴۰	۱٫۰۲۷	۰٫۹۲۷	۰٫۷۵۵	۰٫۸۶۶	۱٫۰۹۶	۰٫۹۳۸	۰٫۹۹۷	۰٫۸۳۴	۱٫۲۵۹	۱٫۱۹۴	۰٫۹۳۰	۱٫۰۵۰
مجموع چاروجهی	۴٫۰۰۰	۴٫۰۰۰	۴٫۰۰۰	۴٫۰۰۰	۴٫۰۰۰	۴٫۰۰۰	۴٫۰۰۰	۴٫۰۰۰	۴٫۰۰۰	۴٫۰۰۰	۴٫۰۰۰	۴٫۰۰۰	۴٫۰۰۰	۴٫۰۰۰
[Al(VI)	۱٫۷۳۴	۱٫۶۲۴	۱٫۴۵۶	۱٫۵۰۴	۱٫۶۲۳	۱٫۶۲۴	۱٫۵۲۴	۱٫۵۷۱	۱٫۵۵۵	۱٫۶۱۱	۱٫۴۹۷	۱٫۵۱۰	۱٫۶۲۰	۱٫۵۵۹
Ti	۰٫۰۷۴	۰٫۰۲۸	۰٫۱۷۵	۰٫۰۶۶	۰٫۱۰۲	۰٫۱۲۴	۰٫۰۸۴	۰٫۱۰۷	۰٫۱۴۲	۰٫۱۲۳	۰٫۰۵۶	۰٫۰۶۶	۰٫۱۱۴	۰٫۰۷۶
Fe2+	۲٫۴۶۲	۲٫۸۳۴	۲٫۷۰۴	۲٫۸۳۷	۲٫۳۷۵	۲٫۲۵۵	۲٫۵۲۴	۲٫۳۶۶	۲٫۳۷۰	۲٫۲۶۵	۲٫۶۴۱	۲٫۵۷۸	۲٫۲۸۱	۲٫۴۹۱
Mn	۰٫۰۰۴	۰٫۰۱۰	۰٫۰۱۲	۰٫۰۰۵	۰٫۰۱۰	۰٫۰۱۱	۰٫۰۱۰	۰٫۰۰۸	۰٫۰۰۹	۰٫۰۰۸	۰٫۰۱۱	۰٫۰۱۱	۰٫۰۱۱	۰٫۰۱۵
Ni	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۴	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۴	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۴	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۶
Mg	۱٫۰۶۶	۱٫۱۸۷	۱٫۰۷۱	۱٫۰۱۷	۰٫۹۶۰	۱٫۱۹۲	۱٫۴۰۴	۱٫۲۸۵	۱٫۲۸۵	۱٫۱۸۶	۱٫۵۴۶	۱٫۵۰۵	۱٫۲۹۶	۱٫۳۶۰
مجموع هشت	۵٫۳۴۷	۵٫۳۶۸	۵٫۴۲۱	۵٫۴۳۲	۵٫۰۷۴	۵٫۲۰۶	۵٫۵۴۸	۵٫۳۴۱	۵٫۳۶۵	۵٫۱۹۶	۵٫۷۵۶	۵٫۶۷۱	۵٫۳۲۶	۵٫۵۰۶
تهی‌جای هشت	۰٫۶۵۴	۰٫۳۱۴	۰٫۵۷۹	۰٫۵۶۸	۰٫۹۲۶	۰٫۷۹۴	۰٫۴۵۲	۰٫۶۵۹	۰٫۶۳۵	۰٫۸۰۴	۰٫۲۴۵	۰٫۳۲۹	۰٫۶۷۴	۰٫۴۹۴
[Ca	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۹	۰٫۰۰۴	۰٫۰۳۲	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۷	۰٫۰۱۶	۰٫۰۰۸
Na	۰٫۰۱۵	۰٫۰۱۹	۰٫۰۱۶	۰٫۰۳۸	۰٫۰۱۷	۰٫۰۴۳	۰٫۰۲۰	۰٫۰۳۰	۰٫۰۲۲	۰٫۰۳۳	۰٫۰۰۴	۰٫۰۲۴	۰٫۰۴۰	۰٫۰۳۸
K	۰٫۳۳۲	۰٫۰۵۳	۰٫۳۵۵	۰٫۳۲۶	۰٫۷۵۰	۰٫۵۳۰	۰٫۲۸۴	۰٫۴۲۸	۰٫۴۰۳	۰٫۵۵۰	۰٫۱۳۴	۰٫۱۷۱	۰٫۳۵۸	۰٫۲۷۵
مجموع	۰٫۳۵۲	۰٫۰۸۱	۰٫۳۷۵	۰٫۳۹۶	۰٫۷۷۴	۰٫۵۷۷	۰٫۳۰۶	۰٫۴۶۵	۰٫۴۲۷	۰٫۵۸۳	۰٫۱۳۸	۰٫۲۰۲	۰٫۴۱۴	۰٫۳۲۱
[OH	۷٫۸۹۴	۷٫۹۹۳	۷٫۹۱۶	۷٫۹۷۱	۷٫۹۰۴	۷٫۹۴۸	۷٫۸۵۵	۷٫۸۶۳	۷٫۸۸۶	۷٫۸۵۷	۷٫۹۹۷	۷٫۹۴۲	۷٫۹۴۵	۷٫۹۵۰
F	۰٫۱۰۲	۰٫۰۰۷	۰٫۰۸۱	۰٫۰۲۷	۰٫۰۸۷	۰٫۰۴۸	۰٫۱۳۹	۰٫۱۲۹	۰٫۱۰۹	۰٫۱۳۵	۰٫۰۰۰	۰٫۰۵۴	۰٫۰۴۸	۰٫۰۴۱
Cl	۰٫۰۰۴	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۹	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۹	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۸	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۷	۰٫۰۱۰
مجموع	۸٫۰۰۰	۸٫۰۰۰	۸٫۰۰۰	۸٫۰۰۰	۸٫۰۰۰	۸٫۰۰۰	۸٫۰۰۰	۸٫۰۰۰	۸٫۰۰۰	۸٫۰۰۰	۸٫۰۰۰	۸٫۰۰۰	۸٫۰۰۰	۸٫۰۰۰
[Si(T1)	۲٫۱۳۴	۱٫۷۲۱	۱٫۹۴۷	۱٫۱۴۷	۲٫۴۹۰	۲٫۲۶۸	۱٫۸۰۸	۲٫۱۲۳	۲٫۰۰۵	۲٫۳۳۲	۱٫۴۸۲	۱٫۶۱۳	۲٫۱۴۱	۱٫۹۰۱
Al(T1)	۰٫۹۳۳	۱٫۱۴۰	۱٫۰۲۷	۰٫۹۲۷	۰٫۷۵۵	۰٫۸۶۶	۱٫۰۹۶	۰٫۹۳۸	۰٫۹۹۷	۰٫۸۳۴	۱٫۲۵۹	۱٫۱۹۴	۰٫۹۳۰	۱٫۰۵۰
Si(T2)	۰٫۹۳۳	۱٫۱۴۰	۱٫۰۲۷	۰٫۹۲۷	۰٫۷۵۵	۰٫۸۶۶	۱٫۰۹۶	۰٫۹۳۸	۰٫۹۹۷	۰٫۸۳۴	۱٫۲۵۹	۱٫۱۹۴	۰٫۹۳۰	۱٫۰۵۰
Al(T2)	۱٫۷۳۴	۱٫۶۲۴	۱٫۴۵۶	۱٫۵۰۴	۱٫۶۲۳	۱٫۶۲۴	۱٫۵۲۴	۱٫۵۷۱	۱٫۵۵۵	۱٫۶۱۱	۱٫۴۹۷	۱٫۵۱۰	۱٫۶۲۰	۱٫۵۵۹
Mg(M1+M4)	۰٫۵۸۳	۰٫۶۶۸	۰٫۵۶۵	۰٫۵۶۶	۰٫۵۰۹	۰٫۶۳۲	۰٫۷۶۶	۰٫۶۹۲	۰٫۶۸۰	۰٫۶۳۲	۰٫۸۵۲	۰٫۸۲۶	۰٫۶۹۶	۰٫۷۴۳
Fe(M1+M4)	۱٫۳۴۶	۱٫۵۹۵	۱٫۴۲۵	۱٫۵۷۷	۱٫۲۶۰	۱٫۱۹۵	۱٫۳۷۶	۱٫۲۷۵	۱٫۲۵۴	۱٫۲۰۷	۱٫۴۵۵	۱٫۴۱۵	۱٫۲۲۶	۱٫۳۶۲
Al(M1+M4)	۰٫۹۳۳	۱٫۱۴۰	۱٫۰۲۷	۰٫۹۲۷	۰٫۷۵۵	۰٫۸۶۶	۱٫۰۹۶	۰٫۹۳۸	۰٫۹۹۷	۰٫۸۳۴	۱٫۲۵۹	۱٫۱۹۴	۰٫۹۳۰	۱٫۰۵۰
(M1+M4)تهی‌جا	۰٫۴۰۱	۰٫۲۴۲	۰٫۲۱۵	۰٫۲۸۹	۰٫۴۳۴	۰٫۳۷۹	۰٫۲۱۴	۰٫۳۱۶	۰٫۲۷۹	۰٫۳۸۸	۰٫۱۱۹	۰٫۱۵۸	۰٫۳۴۵	۰٫۲۵۵
Mg(M2+M3)	۰٫۴۸۳	۰٫۵۱۹	۰٫۵۰۷	۰٫۴۵۲	۰٫۴۵۱	۰٫۵۶۱	۰٫۶۳۹	۰٫۵۹۳	۰٫۶۰۵	۰٫۵۵۴	۰٫۶۹۵	۰٫۶۷۹	۰٫۶۰۰	۰٫۶۱۶
Fe(M2+M3)	۱٫۱۱۶	۱٫۲۳۹	۱٫۲۷۸	۱٫۲۶۰	۱٫۱۱۵	۱٫۰۶۱	۱٫۱۴۷	۱٫۰۹۱	۱٫۱۱۶	۱٫۰۵۸	۱٫۱۸۷	۱٫۱۶۳	۱٫۰۵۶	۱٫۱۲۹
Al(M2+M3)]	۰٫۴۰۱	۰٫۲۴۲	۰٫۲۱۵	۰٫۲۸۹	۰٫۴۳۴	۰٫۳۷۹	۰٫۲۱۴	۰٫۳۱۶	۰٫۲۷۹	۰٫۳۸۸	۰٫۱۱۹	۰٫۱۵۸	۰٫۳۴۵	۰٫۲۵۵
[XSi,tet	۰٫۵۳۴	۰٫۴۳۰	۰٫۴۸۷	۰٫۵۳۷	۰٫۶۲۲	۰٫۵۶۷	۰٫۴۵۲	۰٫۵۳۱	۰٫۵۰۱	۰٫۵۸۳	۰٫۳۷۰	۰٫۴۰۳	۰٫۵۳۵	۰٫۴۷۵
XAl,tet	۰٫۴۶۷	۰٫۵۷۰	۰٫۵۱۳	۰٫۴۶۳	۰٫۳۷۸	۰٫۴۳۳	۰٫۵۴۸	۰٫۴۶۹	۰٫۴۹۹	۰٫۴۱۷	۰٫۶۳۰	۰٫۵۹۷	۰٫۴۶۵	۰٫۵۲۵
XTotal,tet]	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰
[XAl,oct	۰٫۲۹۳	۰٫۲۷۲	۰٫۲۵۰	۰٫۲۵۴	۰٫۲۷۵	۰٫۲۷۶	۰٫۲۵۸	۰٫۲۶۷	۰٫۲۶۶	۰٫۲۷۴	۰٫۲۵۲	۰٫۲۵۵	۰٫۲۷۵	۰٫۲۶۳
XMg,oct	۰٫۱۸۱	۰٫۲۰۱	۰٫۱۸۶	۰٫۱۷۲	۰٫۱۶۵	۰٫۲۰۵	۰٫۲۳۹	۰٫۲۲۰	۰٫۲۲۱	۰٫۲۰۳	۰٫۲۶۲	۰٫۲۵۶	۰٫۲۲۲	۰٫۲۳۲
XFe,oct	۰٫۴۱۶	۰٫۴۷۵	۰٫۴۶۴	۰٫۴۷۸	۰٫۴۰۳	۰٫۳۸۴	۰٫۴۲۷	۰٫۴۰۲	۰٫۴۰۵	۰٫۳۸۶	۰٫۴۴۵	۰٫۴۳۵	۰٫۳۸۸	۰٫۴۲۱
XVacancy,oct	۰٫۱۱۰	۰٫۰۵۳	۰٫۱۰۰	۰٫۰۹۶	۰٫۱۵۷	۰٫۱۳۵	۰٫۰۷۶	۰٫۱۱۲	۰٫۱۰۹	۰٫۱۳۷	۰٫۰۴۱	۰٫۰۵۵	۰٫۱۱۵	۰٫۰۸۴
XTotal,oct]	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰
[XSi(T2)	۰٫۳۹۷	۰٫۴۰۸	۰٫۳۸۹	۰٫۳۸۷	۰٫۲۹۰	۰٫۳۴۳	۰٫۳۴۲	۰٫۳۵۵	۰٫۳۶۰	۰٫۳۵۳	۰٫۳۳۰	۰٫۳۳۹	۰٫۳۹۳	۰٫۳۵۷
XAl(T2)	۰٫۶۰۳	۰٫۵۹۲	۰٫۶۱۲	۰٫۶۱۳	۰٫۷۱۰	۰٫۶۵۷	۰٫۶۵۸	۰٫۶۴۵	۰٫۶۴۰	۰٫۶۴۷	۰٫۶۷۰	۰٫۶۶۱	۰٫۶۰۷	۰٫۶۴۴

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.3.2.6]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.3.557]

ادامه جدول۳

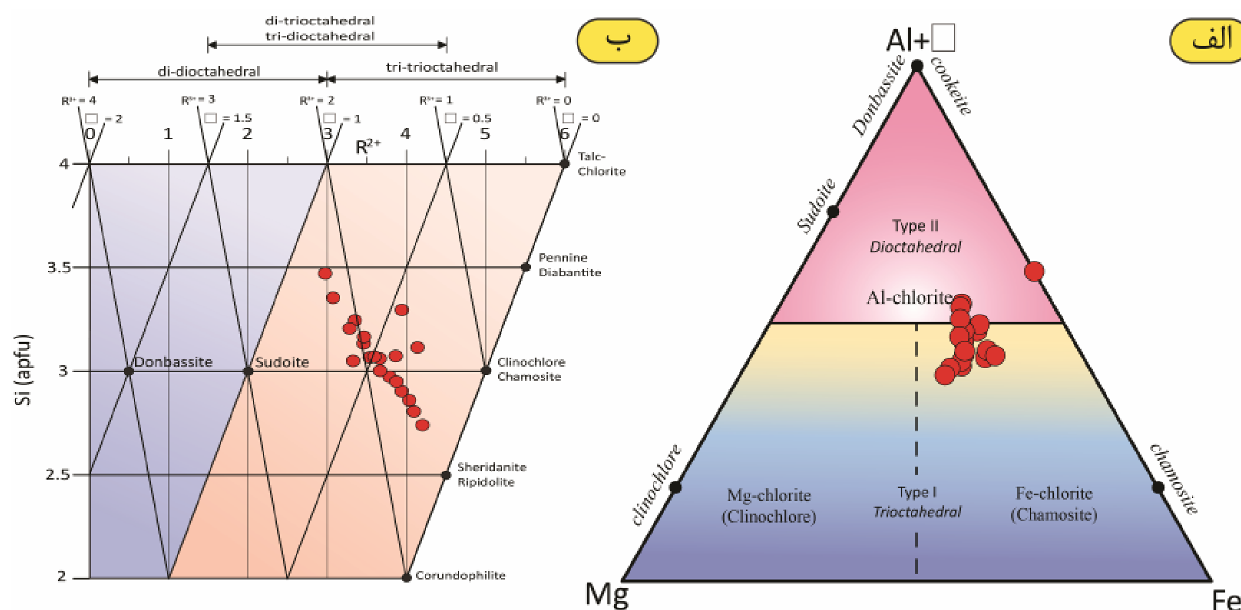
No. Samples	۲۸	۲۹	۳۰	۳۱	۳۲	۵۳	۵۵	۵۶	۵۷	۵۸	۵۹	۶۰	۶۲	۶۳
XFe(M2M3)	۰/۵۹۳	۰/۶۲۲	۰/۶۴۳	۰/۶۷۳	۰/۶۵۸	۰/۵۸۳	۰/۵۹۶	۰/۵۸۵	۰/۵۸۱	۰/۵۸۴	۰/۵۹۷	۰/۵۹۱	۰/۵۵۵	۰/۵۹۱
XMg(M2M3)	۰/۲۵۷	۰/۲۶۱	۰/۲۵۵	۰/۲۴۱	۰/۲۶۶	۰/۳۰۸	۰/۳۳۲	۰/۳۱۸	۰/۳۱۵	۰/۳۰۶	۰/۳۵۰	۰/۳۴۵	۰/۳۱۵	۰/۳۲۳
XAl(M2M3)	۰/۱۵۱	۰/۱۱۷	۰/۱۰۲	۰/۰۸۶	۰/۰۷۶	۰/۱۰۸	۰/۰۷۳	۰/۰۹۷	۰/۱۰۴	۰/۱۱۰	۰/۰۵۳	۰/۰۶۴	۰/۱۳۰	۰/۰۸۷
XFe(M1)	۰/۳۴۴	۰/۴۱۱	۰/۴۱۰	۰/۴۴۴	۰/۳۰۴	۰/۳۰۷	۰/۳۴۶	۰/۳۳۵	۰/۳۳۲	۰/۳۱۹	۰/۳۴۹	۰/۳۴۸	۰/۳۳۶	۰/۳۴۹
XMg(M1)	۰/۱۴۹	۰/۱۷۲	۰/۱۶۳	۰/۱۵۹	۰/۱۲۳	۰/۱۶۲	۰/۱۹۲	۰/۱۸۲	۰/۱۸۰	۰/۱۶۷	۰/۲۰۴	۰/۲۰۳	۰/۱۹۱	۰/۱۹۰
XAl(M1)	۰/۲۰۶	۰/۱۸۴	۰/۲۲۳	۰/۲۲۵	۰/۴۲۰	۰/۳۱۴	۰/۳۱۶	۰/۲۹۰	۰/۲۸۰	۰/۲۹۳	۰/۳۴۰	۰/۳۲۲	۰/۲۱۵	۰/۲۸۷
XVacancy(M1)]	۰/۳۰۱	۰/۲۳۴	۰/۲۰۴	۰/۱۷۲	۰/۱۵۳	۰/۲۱۷	۰/۱۴۶	۰/۱۹۴	۰/۲۰۹	۰/۲۲۰	۰/۱۰۶	۰/۱۲۷	۰/۲۵۹	۰/۱۷۴
[Si	۳/۰۶۷	۲/۸۶۰	۲/۹۷۳	۳/۰۷۳	۳/۲۴۵	۳/۱۳۴	۲/۹۰۴	۳/۰۶۲	۳/۰۰۳	۳/۱۶۶	۲/۷۴۱	۲/۸۰۶	۳/۰۷۰	۲/۹۵۱
Fe/(Fe+Mg)	۰/۶۹۸	۰/۷۰۵	۰/۷۱۶	۰/۷۳۶	۰/۷۱۲	۰/۶۵۴	۰/۶۴۳	۰/۶۴۸	۰/۶۴۸	۰/۶۵۶	۰/۶۳۱	۰/۶۳۲	۰/۶۳۸	۰/۶۴۷
Fe(total)	۲/۴۶۲	۲/۸۳۴	۲/۷۰۴	۲/۸۳۷	۲/۳۷۵	۲/۲۵۵	۲/۵۲۴	۲/۳۶۶	۲/۳۷۰	۲/۲۶۵	۲/۶۴۱	۲/۵۷۸	۲/۲۸۱	۲/۴۹۱
جمعیت هشت وجهی	۵/۳۴۷	۵/۶۸۶	۵/۴۲۱	۵/۴۳۲	۵/۰۷۴	۵/۲۰۶	۵/۵۴۸	۵/۳۴۱	۵/۳۶۵	۵/۱۹۶	۵/۷۵۶	۵/۶۷۱	۵/۳۲۶	۵/۵۰۶
تهی‌جا	۰/۶۵۴	۰/۳۱۴	۰/۵۷۹	۰/۵۶۸	۰/۹۲۶	۰/۷۹۴	۰/۴۵۲	۰/۶۵۹	۰/۶۳۵	۰/۸۰۴	۰/۲۴۵	۰/۳۲۹	۰/۶۷۴	۰/۴۹۴
(XAl+XVacancy)	۳/۳۲۱	۳/۰۷۸	۳/۰۶۲	۲/۹۹۸	۳/۳۰۵	۳/۲۸۴	۳/۰۷۲	۳/۱۶۸	۳/۱۸۷	۳/۲۴۹	۳/۰۰۱	۳/۰۳۳	۳/۲۲۳	۳/۱۰۳
(Fe۲+Mg)	۳/۵۲۸	۴/۰۲۱	۳/۷۷۵	۳/۸۵۴	۳/۳۳۵	۳/۴۴۷	۳/۹۲۸	۳/۶۵۱	۳/۶۵۵	۳/۴۵۱	۴/۱۸۷	۴/۰۸۳	۳/۵۷۷	۳/۸۵۰
R2+	۳/۵۳۸	۴/۰۳۴	۳/۷۹۰	۳/۸۶۳	۳/۳۴۸	۳/۴۵۸	۳/۹۴۱	۳/۶۶۴	۳/۶۶۸	۳/۴۶۳	۴/۲۰۳	۴/۰۹۴	۳/۵۹۳	۳/۸۷۱
R3+]	۱/۸۰۸	۱/۶۵۱	۱/۶۳۱	۱/۵۷۰	۱/۷۲۶	۱/۷۴۸	۱/۶۰۸	۱/۶۷۷	۱/۶۹۷	۱/۷۳۴	۱/۵۵۳	۱/۵۷۷	۱/۷۳۳	۱/۶۳۴
[Al/(Al+Mg+Fe۲+)	۰/۴۳۱	۰/۴۰۷	۰/۳۹۷	۰/۳۸۷	۰/۴۱۶	۰/۴۱۹	۰/۴۰۰	۰/۴۰۷	۰/۴۱۱	۰/۴۱۵	۰/۳۹۷	۰/۳۹۸	۰/۴۱۶	۰/۴۰۴
Mg/(Mg+Fe۲+)	۰/۳۰۲	۰/۲۹۵	۰/۲۸۵	۰/۲۶۴	۰/۲۸۸	۰/۳۴۶	۰/۳۵۸	۰/۳۵۲	۰/۳۵۲	۰/۳۴۴	۰/۳۶۹	۰/۳۶۹	۰/۳۶۲	۰/۳۵۳
AlVI/(Si+AlIV)]	۰/۲۳۳	۰/۲۸۵	۰/۲۵۷	۰/۲۳۲	۰/۱۸۹	۰/۲۱۶	۰/۲۷۴	۰/۲۳۵	۰/۲۴۹	۰/۲۰۹	۰/۳۱۵	۰/۲۹۸	۰/۲۳۲	۰/۲۶۲
%[Al-chl	۲۵/۳۴۳	۲۴/۴۷۶	۲۳/۷۳۳	۲۲/۶۸۰	۲۳/۹۸۴	۲۴/۵۴۶	۲۴/۰۲۹	۲۴/۰۲۴	۲۴/۴۹۳	۲۴/۱۴۹	۲۴/۲۴۳	۲۴/۱۷۳	۲۴/۵۲۷	۲۴/۱۱۱
Fe-chl	۵۴/۳۹۹	۵۴/۴۹۴	۵۵/۷۸۷	۵۸/۳۳۱	۵۶/۶۴۹	۵۱/۹۴۶	۵۰/۲۱۵	۵۱/۳۶۶	۵۰/۸۴۱	۵۲/۴۱۵	۴۸/۵۵۲	۴۸/۹۲۶	۵۰/۵۳۶	۵۰/۷۵۴
Mg-chl]	۲۰/۲۵۷	۲۱/۰۳۰	۲۰/۴۸۱	۱۸/۹۸۹	۱۹/۳۶۸	۲۳/۵۰۸	۲۵/۷۵۶	۲۴/۶۱۰	۲۴/۶۶۶	۲۳/۴۳۷	۲۷/۲۰۶	۲۶/۹۰۱	۲۴/۹۳۷	۲۵/۱۳۶
کلینوکلر	۳۰/۱۸۵	۲۹/۴۴۸	۲۸/۲۹۵	۲۶/۳۶۱	۲۸/۷۱۱	۳۴/۴۷۴	۳۵/۶۶۰	۳۵/۱۲۳	۳۵/۰۶۹	۳۴/۲۹۷	۳۶/۸۳۴	۳۶/۷۵۱	۳۶/۱۱۲	۳۵/۱۷۶
Chamosite	۶۹/۷۱۷	۷۰/۳۰۷	۷۱/۳۹۶	۷۳/۵۰۰	۷۱/۰۰۳	۶۵/۲۲۰	۶۴/۰۸۵	۶۴/۶۷۳	۶۴/۶۷۸	۶۵/۴۷۸	۶۲/۹۰۴	۶۲/۹۷۴	۶۳/۵۷۰	۶۴/۴۳۷
Pennantite]	۰/۰۹۸	۰/۲۴۵	۰/۳۰۹	۰/۱۳۹	۰/۲۸۶	۰/۳۰۶	۰/۲۵۵	۰/۲۰۴	۰/۲۵۳	۰/۲۲۵	۰/۲۶۳	۰/۲۷۵	۰/۳۱۸	۰/۳۸۷
زیرگروه(R)	tri-tri	tri-tri	tri-tri	tri-tri	tri-tri	tri-tri	tri-tri	tri-tri	tri-tri	tri-tri	tri-tri	tri-tri	tri-tri	tri-tri
Subgroup (Vacancy)	tri-tri	tri-tri	tri-tri	tri-tri	tri-tri	tri-tri	tri-tri	tri-tri	tri-tri	tri-tri	tri-tri	tri-tri	tri-tri	tri-tri
نوع	Type-I	Type-I	Type-I	Type-I	Type-I	Type-I	Type-I	Type-I	Type-I	Type-I	Type-I	Type-I	Type-I	Type-I
[۳۱]	Al chlorite	Fe chlorite	Fe chlorite	Fe chlorite	Al chlorite	Al chlorite	Al chlorite	Al chlorite	Al chlorite	Al chlorite	Al chlorite	Al chlorite	Al chlorite	Al chlorite
[۳۳]	Chamosite	Chamosite	Chamosite	Chamosite	Chamosite	Chamosite	Chamosite	Chamosite	Chamosite	Chamosite	Chamosite	Chamosite	Chamosite	Chamosite
[۳۴]	Chamosite	Chamosite	Chamosite	Chamosite	Chamosite	Chamosite	Chamosite	Chamosite	Chamosite	Chamosite	Chamosite	Chamosite	Chamosite	Chamosite
TKML87-AlIV(ºC)	۲۶۸	۳۱۲	۲۸۹	۲۶۹	۲۳۱	۲۵۰	۲۹۸	۲۶۵	۲۷۸	۲۴۴	۳۳۲	۳۱۸	۲۶۲	۲۸۸
TC88-AlIV(ºC)	۲۳۸	۳۰۵	۲۶۹	۲۳۶	۱۸۱	۲۱۷	۲۹۱	۲۴۰	۲۵۹	۲۰۷	۳۴۳	۳۲۲	۲۳۷	۲۷۶

فرمول کلی کلریت‌ها

$$R_x^{2+} R_y^{3+} \square_{12-x-y})_{12}^{VI} (Si_z R_{8-z}^{3+})_8^{IV} O_{20} (OH)_{16}$$

(R^{2+} کاتیون‌های دوظرفیتی، R^{3+} = کاتیون‌های سه ظرفیتی و □= تهی‌جای) است. تنوع ترکیب کلریت‌ها از چهاروجهی‌ها و هشت‌وجهی‌های آن ناشی می‌شود. بر این اساس، کلریت‌ها با استفاده از R و تهی‌جاها رده‌بندی می‌شوند. بر پایه جدول ۳، کلریت‌ها در گروه II و بیشتر در گروه I قرار دارند. در کلریت‌های سازنده سنگ، Mg, Fe و Al کاتیون‌های اصلی هشت وجهی هستند و افزایش Al اغلب با افزایش تهی‌جاها همراه است، بنابراین کلریت‌های گروه I آن‌هایی دارای $X_{Mg}+X_{Fe(tot)} \geq X_{Al}+X_{\square}$ و کلریت‌های گروه II دارای $X_{Mg}+X_{Fe(tot)} < X_{Al}+X_{\square}$ (X: تعداد اتم‌ها در واحد فرمولی) هستند [۳۱] و براساس رده بندی مرجع [۳۲]، کلریت‌های گیسور در گستره آهن و آلومینیم‌دار قرار دارند (شکل ۶ الف). آنها بر اساس نمودار X_{Mg}-$^{VI}R^{3+}$ [۳۲] و نمودار سامانه متحد R^{2+}-Si [۳۳] در زیرگروه سه-سه/سه-دو و یا دو-سه هشت-وجهی (شکل ۶ ب) و در گستره شاموزیت تا سُدوئیت [۳۳، ۳۴] رده‌بندی می‌شوند. این دو گروه در سنگ‌های دگرگونی با ترکیبات و شرایط دما-فشار مختلف ایجاد می‌شوند. کلریت‌های نوع II از متاپلیت‌های دما پایین/فشار متوسط هستند و در متاپلیت‌های غنی از Al تشکیل می‌شوند و کلریت‌های نوع I از متاپلیت‌های فشار پایین هستند و با Bt+Grt در دمای پایین و با Bt+Grt+St در رخساره آمفیبولیت همزیست هستند [۳۱].

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.3.2.6]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.3.557]



شکل ۶ الف) نمونه‌های کلریت گیسور که در هر دو گروه I و II قرار دارند [۳۱]. ب) نمونه‌های کلریت گیسور که زیرگروه سه- سه / سه -دو ویا دو- سه هشت وجهی هستند [۳۳].

استارولیت

فرمول ساختاری استارولیت بر اساس ۴۶ اکسیژن محاسبه شد (جدول ۴). بر پایه نتایج تجزیه نقطه‌ای مقدار ZnO کمتر از ۷٫۴ Wt% است. بنابراین آن‌ها در رده استارولیت‌های روی‌دار قرار ندارند [۳۵]. مقدار Fe*100/(Fe+Mg+Mn) بین ۸۸٫۴۹ تا ۹۰٫۷۷ درصد تغییر می‌کند، بنابراین استارولیت آهن‌دار است [۲۴]. این داده‌ها نشان می‌دهند که استارولیت آهن‌دار می‌تواند در محیط دگرگونی که آندالوزیت تشکیل می‌شود به وجود آید [۲۴].

جدول ۴ نتایج تجزیه نقطه‌ای استارولیت و محاسبه فرمول ساختاری آن.

شماره نمونه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
SiO_2	۲۷٫۷۰	۲۷٫۰۳۳	۲۷٫۶۷۷	۲۷٫۲۴۷	۲۷٫۳۵۵	۲۷٫۱۶۷	۲۸٫۵۵۸	۲۷٫۷۳۳
TiO_2	۰٫۲۵	۰٫۵۰۸	۰٫۲۱۸	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۵۴	۰٫۳۶۸
Al_2O_3	۵۶٫۰۰	۵۶٫۲۲	۵۶٫۲۳۱	۵۶٫۴۴۳	۵۶٫۷۱۹	۵۶٫۶۸۴	۵۶٫۸۹	۵۶٫۳۰۱
FeO	۱۲٫۱۹	۱۲٫۶۱۴	۱۲٫۴۵۵	۱۲٫۴۳۵	۱۲٫۵۹	۱۲٫۵۰۲	۱۱٫۸۷۶	۱۲٫۰۳۸
ZnO	۱٫۰۳	۰٫۹۸۵	۱٫۰۳۷	۱٫۰۶۲	۰٫۷۹۷	۰٫۹۲۸	۰٫۹۰۲	۰٫۸۳۶
MnO	۰٫۱۴	۰٫۱۳۸	۰٫۱۲۶	۰٫۱۵۲	۰٫۱۸۴	۰٫۱۰۶	۰٫۱۴۵	۰٫۱۵۹
MgO	۰٫۶۶	۰٫۶۵۳	۰٫۶۳۹	۰٫۷۵۴	۰٫۸۱۴	۰٫۷۷۱	۰٫۶۷۵	۰٫۷
CaO	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰۴	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱۱	۰٫۰۱۸
مجموع	۹۷٫۹۷	۹۸٫۱۵۱	۹۸٫۳۸۷	۹۸٫۰۹۴	۹۸٫۴۵۹	۹۸٫۱۵۸	۹۹٫۱۱۱	۹۸٫۱۵۳
Si	۷٫۶۴	۷٫۴۶	۷٫۶۱	۷٫۵۲	۷٫۵۱	۷٫۴۹	۷٫۷۵	۷٫۶۲
$Al^{(iv)}$	۰٫۳۶	۰٫۵۴	۰٫۳۹	۰٫۴۸	۰٫۴۹	۰٫۵۱	۰٫۲۵	۰٫۳۸
$Al^{(vi)}$	۱۷٫۸۳	۱۷٫۷۶	۱۷٫۸۳	۱۷٫۸۷	۱۷٫۸۸	۱۷٫۹۰	۱۷٫۹۵	۱۷٫۸۵
Ti	۰٫۰۵	۰٫۱۱	۰٫۰۵	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۸
Mg	۰٫۲۷	۰٫۲۷	۰٫۲۶	۰٫۳۱	۰٫۳۳	۰٫۳۲	۰٫۲۷	۰٫۲۹
$Fe^{2}+$	۲٫۸۱	۲٫۹۱	۲٫۸۶	۲٫۸۷	۲٫۸۹	۲٫۸۸	۲٫۷۰	۲٫۷۷
Mn	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۰۴
Zn	۰٫۲۱	۰٫۲۰	۰٫۲۱	۰٫۲۲	۰٫۱۶	۰٫۱۹	۰٫۱۸	۰٫۱۷
Ca	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱
XFe	۰٫۸۹	۰٫۹۰	۰٫۹۰	۰٫۸۸	۰٫۸۷	۰٫۸۸	۰٫۸۹	۰٫۸۹
XMg	۰٫۱۱	۰٫۱۰	۰٫۱۰	۰٫۱۲	۰٫۱۳	۰٫۱۲	۰٫۱۱	۰٫۱۱
Fe*100/(Fe+Mg+Mn)	۹۰٫۲۷	۹۰٫۶۳	۹۰٫۷۷	۸۹٫۲۵	۸۸٫۴۹	۸۹٫۴۱	۸۹٫۷۹	۸۹٫۵۲
Ferroan/Zincian	Ferroan	Ferroan	Ferroan	Ferroan	Ferroan	Ferroan	Ferroan	Ferroan

میکای سفید

نتایج تجزیه نقطه‌ای ترکیب شیمیایی میکای سفید در جدول ۵ آمده است. فرمول ساختاری میکا بر پایه ۱۱ اکسیژن محاسبه شد. مجموع کل اکسیدها بین ۹۴٫۶۵ و ۹۸٫۰۵ درصد است. Fe^{2+} بین ۰٫۰۱۶ و ۰٫۰۶۱ و Fe^{3+} بین ۰٫۰۰ و ۰٫۰۳۸ درصد تغییر می‌کند. Mg بین ۰٫۰۲۶ و ۰٫۰۳۸ و Na بین ۰٫۰۷۵ و ۰٫۱۸۳ درصد در تغییر است که نشان دهنده جایگزینی قابل ملاحظه عضو پایانی پاراگونیت است، بنابراین جانشینی KNa_{-1} در جایگاه A فرمول ساختاری آن رخ می‌دهد [۲۸]. سازندهای سلادونیت و فروسلادونیت در آن ناچیز است. مقدار فعالیت اعضای پایانی میکای سفید که براساس مرجع [۳۶] محاسبه شده‌اند در جدول ۵ آمده‌اند.

برآورد شرایط P-T دگرگونی

زمین دما-فشارسنجی

شرایط فشار-دمای دگرگونی بوسیله زمین دما-فشارسنج های مرسوم محاسبه شده‌اند. در اینجا از آنجا که داده‌های مربوط به بیوتیت جایگزینی آن را با کلریت تأیید می‌کند نمی‌توان از روش بیوتیت –گارنت [۳۷] استفاده کرد. بنابراین نخست مقدار فشار از روش گارنت-مسکوویت-سیلیمانیت-کوارتز [۳۸] با استفاده از برنامه GTB [۱۶] محاسبه گردید و سپس از روش مقدار تیتان در مسکوویت [۳۹، ۴۰] مقدار دما ارزیابی شد. مقدار فشار و دما به ترتیب در گستره ۴٫۴ kbar - ۴٫۳ و ^{o}C ۵۵۰-۵۵۸ بدست آمد و تعادلات فازی برای نمونه‌ی متاپلیتی با ترموکالک [۱۴] بررسی شد (جدول ۶). شرایط دما-فشار متوسط برای ترکیب‌های مرکز کانی‌های متاپلیتی در نمونه MG_{31B} با این فرض که پلاژیوکلاز حدواسط و بیوتیت‌ها سالم و از نوع آنیت و فلوگوپیت باشند ^{o}C ۶۰۱ و ۴٫۲ kbar بدست آمد (جدول ۷).

مدل‌سازی ترمودینامیکی

بر پایه ترکیب شیمیایی سنگ کل دو نمونه MG_{31B} و MG_{39} (جدول ۸) و کانی‌های موجود در این نمونه سنگ‌ها، تعادلات فازی از متاپلیت‌های گیسور در سامانه MnNCKFMASH ($MnO-Na_2O-CaO-K_2O-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$) بررسی شد. نمودارهای فشار-دما (P-T) شبه مقاطع (یا نمودارهای مجموعه کانی، MADS) برای این متاپلیت‌ها با استفاده از برنامه فورترن Gibbs [۱۵] رسم شد. در این برنامه از بانک‌های اطلاعاتی HP98 [۳۶] و SPaC 2014 [۴۱] استفاده گردید.

جدول ۵ نتایج تجزیه نقطه‌ای میکای سفید و محاسبه فرمول ساختاری آن.

شماره نمونه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
SiO_2	۴۷٫۱۶	۴۶٫۰۷	۴۶٫۰۰	۴۶٫۴۸	۴۶٫۷۵	۴۶٫۹۲	۴۶٫۹۱	۴۸٫۳۳	۴۸٫۴۷	۴۷٫۸۹	۴۸٫۵۸	۴۷٫۸۴
TiO_2	۰٫۵۳	۰٫۵۶	۰٫۳۸	۰٫۴۹	۰٫۳۴	۰٫۳۲	۰٫۳۴	۰٫۲۲	۰٫۲۶	۰٫۲۳	۰٫۱۶	۰٫۲۲
Al_2O_3	۳۷٫۰۴	۳۷٫۰۲	۳۷٫۱۴	۳۷٫۰۳	۳۷٫۳	۳۷٫۱۹	۳۷٫۰۲	۳۸٫۴۱	۳۸٫۵	۳۸٫۲۹	۳۸٫۲۲	۳۷٫۹۱
Fe_2O_3	۰٫۷۶	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
FeO	۰٫۲۹	۱٫۰۳	۱٫۰۱	۰٫۹۸	۰٫۸۹	۱٫۰۳	۱٫۱۱	۰٫۷۲	۰٫۶۳	۰٫۶۹	۰٫۶۷	۰٫۶۴
MnO	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱
MgO	۰٫۳۴	۰٫۳۱	۰٫۳۲	۰٫۲۸	۰٫۲۷	۰٫۳۳	۰٫۳۹	۰٫۳۶	۰٫۲۹	۰٫۳۵	۰٫۳۸	۰٫۳۴
CaO	۰٫۰۵	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۴	۰٫۰۳	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۰
Na_2O	۰٫۵۹	۱٫۱۱	۰٫۹۹	۰٫۹۷	۱٫۰۷	۰٫۹۶	۰٫۹	۱٫۲۹	۱٫۴۹	۱٫۴۲	۱٫۲	۱٫۴۳
K_2O	۷٫۸۹	۹٫۴	۹٫۴۱	۹٫۴۱	۹٫۲۷	۹٫۱۶	۹٫۴۹	۸٫۵۷	۸٫۳۸	۸٫۱	۸٫۴۸	۸٫۶۴
مجموع	۹۴٫۶۵	۹۵٫۵۲	۹۵٫۲۵	۹۵٫۶۴	۹۵٫۹۱	۹۵٫۹۲	۹۶٫۲۲	۹۷٫۹۴	۹۸٫۰۵	۹۶٫۹۸	۹۷٫۷۱	۹۷٫۰۲
Si	۳٫۰۹	۳٫۰۳۷	۳٫۰۳۹	۳٫۰۵۵	۳٫۰۵۹	۳٫۰۶۸	۳٫۰۶۶	۳٫۰۷۶	۳٫۰۷۸	۳٫۰۷۲	۳٫۰۹۴	۳٫۰۷۸
Ti	۰٫۰۲۶	۰٫۰۲۸	۰٫۰۱۹	۰٫۰۲۴	۰٫۰۱۷	۰٫۰۱۶	۰٫۰۱۷	۰٫۰۱۱	۰٫۰۱۳	۰٫۰۱۱	۰٫۰۰۸	۰٫۰۱
Al	۲٫۸۶۱	۲٫۸۷۷	۲٫۸۹۲	۲٫۸۷	۲٫۸۷۸	۲٫۸۶۷	۲٫۸۵۳	۲٫۸۸۲	۲٫۸۸۳	۲٫۸۹۶	۲٫۸۷	۲٫۸۷۵
Fe^{+3}	۰٫۰۳۸	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Fe^{+2}	۰٫۰۱۶	۰٫۰۵۷	۰٫۰۵۶	۰٫۰۵۴	۰٫۰۴۸	۰٫۰۵۷	۰٫۰۶۱	۰٫۰۳۸	۰٫۰۳۳	۰٫۰۳۷	۰٫۰۳۶	۰٫۰۳۴
Mn	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Mg	۰٫۰۳۳	۰٫۰۳۱	۰٫۰۳۱	۰٫۰۲۷	۰٫۰۲۶	۰٫۰۳۲	۰٫۰۳۸	۰٫۰۳۴	۰٫۰۲۸	۰٫۰۳۴	۰٫۰۳۶	۰٫۰۳۲
Ca	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰
Na	۰٫۰۷۵	۰٫۱۴۲	۰٫۱۲۷	۰٫۱۲۳	۰٫۱۳۶	۰٫۱۲۲	۰٫۱۱۵	۰٫۱۵۹	۰٫۱۸۳	۰٫۱۷۶	۰٫۱۴۸	۰٫۱۷۹
K	۰٫۶۶	۰٫۷۹۱	۰٫۷۹۳	۰٫۷۸۹	۰٫۷۷۴	۰٫۷۶۴	۰٫۷۹۲	۰٫۶۹۶	۰٫۶۷۹	۰٫۶۶۳	۰٫۶۸۹	۰٫۷۰۹
مجموع کاتیون ها	۶٫۸۰۲	۶٫۹۶۳	۶٫۹۵۷	۶٫۹۴۳	۶٫۹۴۱	۶٫۹۲۶	۶٫۹۴۵	۶٫۹۰۰	۶٫۸۹۹	۶٫۸۸۹	۶٫۸۸۲	۶٫۹۱۸
Ms	۰٫۸۶	۰٫۷۴	۰٫۷۶	۰٫۷۵	۰٫۷۶	۰٫۷۵	۰٫۷۵	۰٫۷۶	۰٫۷۵	۰٫۷۷	۰٫۷۶	۰٫۷۴
Pa	۰٫۱۲۱	۰٫۴۲	۰٫۳۶	۰٫۳۷	۰٫۴	۰٫۳۳	۰٫۳۵	۰٫۳۷	۰٫۴۳	۰٫۳۶	۰٫۳۵	۰٫۴۶
cel	--	۰٫۰۰۴۵	--	--	--	--	۰٫۰۰۴۸	--	--	--	--	--
fcel	--	۰٫۰۰۸۳	--	--	--	--	۰٫۰۰۷۷	--	--	--	--	--

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.3.2.6]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.3.557]

جدول ۶ مجموعه واکنش‌های مستقل استفاده شده در برآورد شرایط متوسط دما - فشار برای بیشترین دگرگونی در متاپلیت MG31B با استفاده از برنامه ترموکالک (نمادهای استفاده شده، از برنامه ترموکالک است).

1) gr + 2sill + q = 3an
2) 23gr + 6mst + 48q = 8py + 69an +12H_2O
3) 23gr + 6fst + 48q = 8alm + 69an +12H_2O
4) phl + 2sill + q = py + mu
5) ann + 2sill + q = alm + mu

جدول ۷ نتایج محاسبات تعادلات فازی با ترموکالک.

نمونه	*T (° C)*	*P (kbar)*	*SD (T)*	*SD (P)*	*Correl.*	*Fit*
MG_{31B}	۶۰۱	۴٫۲	۴۸	۲٫۰	۰٫۸۹۳	۲٫۰۶

جدول ۸ نتایج تجزیه سنگ کل دو نمونه از متاپلیت‌ها.

نمونه	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	MnO	Cr_2O_3	L.O.I.(مواد فرار	مجموع
MG_{31B}	۴۱٫۸۲	۳۶٫۳۱	۹٫۷۵	۱٫۷۹	۰٫۶۵	۰٫۴۸	۲٫۷۲	۱٫۷۱	۰٫۲	۰٫۱۱	۰٫۰۲۹	۴٫۱	۹۹٫۶۷
MG_{39}	۵۴٫۹۶	۲۲٫۵۹	۹٫۱۳	۲٫۲۸	۱٫۱۴	۲٫۵۴	۲٫۶۱	۰٫۹۹	۰٫۱۲	۰٫۱۳	۰٫۰۲۱	۳٫۲	۹۹٫۷۱

نمودار P-T شبه مقاطع برای هر دو نمونه سنگ کل در گستره فشار ۶٫۵ kbar -۲ و دمای ^{o}C ۷۰۰-۳۰۰ در سامانه مدل MnNCKFMASH (شکل ۷) رسم شد. ترکیب سنگ کل نمونه MG31B از متاپلیت‌های پهنه سیلیمانیت و نمونه MG39 از پهنه گارنت توسط تجزیه سنگ کل ICP-AES تعیین شد. در این ترکیب‌ها، همه Fe بصورت FeO فرض شد. شبه مقاطعِ رسم شده برای هر دو نمونه با ترکیب‌های همنما-های XAlm, XSps و XGrs [۴۲] گارنت تراز شدند (شکل ۷).

شرایط P-T برآمده از مرکز گارنت در نمونه MG_{31B}، فشار ۴٫۹ kbar و دمای ^{o}C ۶۰۸ و برای لبه آن مقادیر kbar ۴٫۶ و ^{o}C ۶۰۶ را نشان می‌دهد در حالی که شرایط P-T برای مرکز گارنت Grt_1 در نمونه MG_{39} مقدار فشار ۵٫۴ kbar و دمای ^{o}C ۵۹۶ است که به نظر بیشینه فشار دگرگونی را نشان می‌دهد و برای لبه Grt_1 این نمونه، فشار ۳٫۸ kbar و دما ^{o}C ۵۹۳ بدست آمد. این شرایط دمایی چنان که پیشتر بر پایه نسبت Fe/(Fe+Mg) برای تغییرات دمای بین مرکز و لبه پیش‌بینی شده بود، برای هر دو نمونه نزدیک به هم است. اما ترکیب‌های همنماهای گارنت Grt_2 بر این شبه مقاطع همدیگر را قطع نمی‌کنند. این ناشی از عدم تعادل ترکیب‌های گارنت Grt_2 است، زیرا شبه مقاطع نمودارهای تعادلی به حساب می-آیند [۴۲]. چنان که در شکل ۷ دیده می‌شود، تغییرات ترکیب شیمیایی از مرکز به سوی لبه‌های گارنت، مرحله کاهش فشار را نشان می‌دهند. مولفه X_{Grs} گارنت ($X_{Grs}=Ca/(Fe^{2+}+Mg+Mn+Ca)$) برای مدل‌سازیِ ترکیب گارنت استفاده شد، زیرا توزیع Ca در گارنت حساسیت کمی به پخش دارد، اما به فشار حساس بوده و به دما به نسبت غیر حساس است [۲۸]. و مؤلفه‌های X_{Alm} وX_{Sps} گارنت که در محاسبات استفاده شد به ترتیب $X_{Alm}=Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg+Mn+Ca)$ و $X_{Sps}=Mn/(Fe^{2+}+Mg+Mn+Ca)$ است. مولفه‌های کسر مولی آلماندن و اسپسارتین نیز بعلت ارتباط زمین شیمیایی آنها انتخاب شدند [۲۴]. این دو مولفه به دما حساس بوده و غیر حساس به فشار هستند. X_{Grs} در مسیر کاهش فشار، کاهش می‌یابد [۲۸]. سیلیمانیت مشاهده شده در مقطع نازک نمونه MG_{31B}، دمایی بیش از حدود ^{o}C ۵۵۰ و فشاری کمتر از حدود ۵٫۵ kbar را نشان می‌دهد.

زمین دماسنجی کلریت‌ها بر پایه کارهای تجربی

تغییرات ترکیبی بدون تناسب عنصری کلریت‌ها، اطلاعات مفیدی را درباره شرایط فیزیکوشیمیایی بویژه برای تعیین دما فراهم می‌سازد [۴۳]. دو نوع زمین دماسنجی کلریت وجود دارد: واسنجی تجربی (مثل زمین دماسنج های کلریت بر پایه تهی‌جای آلومینیم چهاروجهی/یا تهی‌جای هشت‌وجهی) و واسنجی نیمه-تجربی و برپایه محاسبات ترمودینامیکی (مانند زمین دماسنج های کلریت برپایه فعالیت اعضای پایانی).

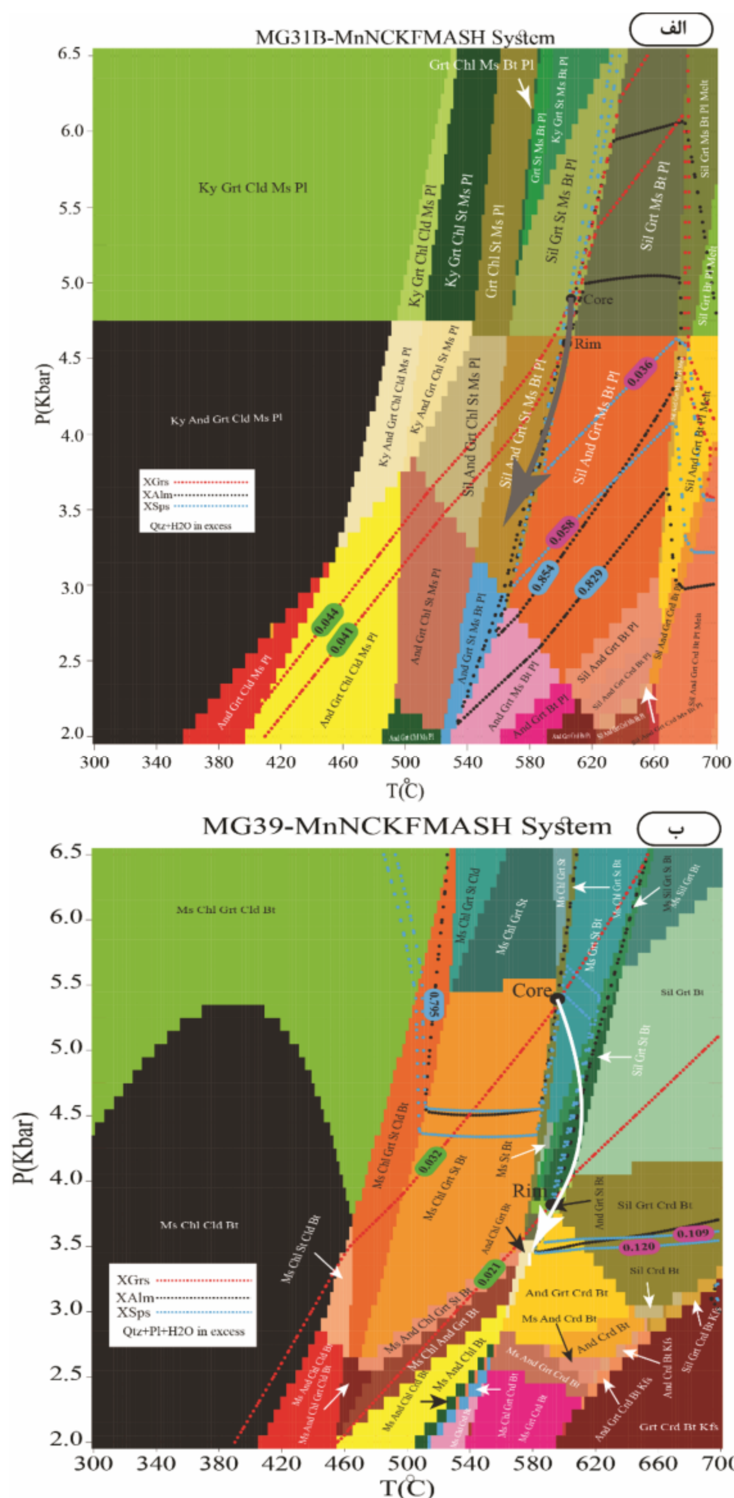
برای محاسبه دمای بیوتیت‌های کلریتی شده در مجموعه دگرگونی گیسور از توابع ارائه شده در مراجع [۴۵،۴۴] که در محیط‌های گوناگون کاربرد دارند، استفاده شد (جدول ۳).

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.3.2.6]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.3.557]

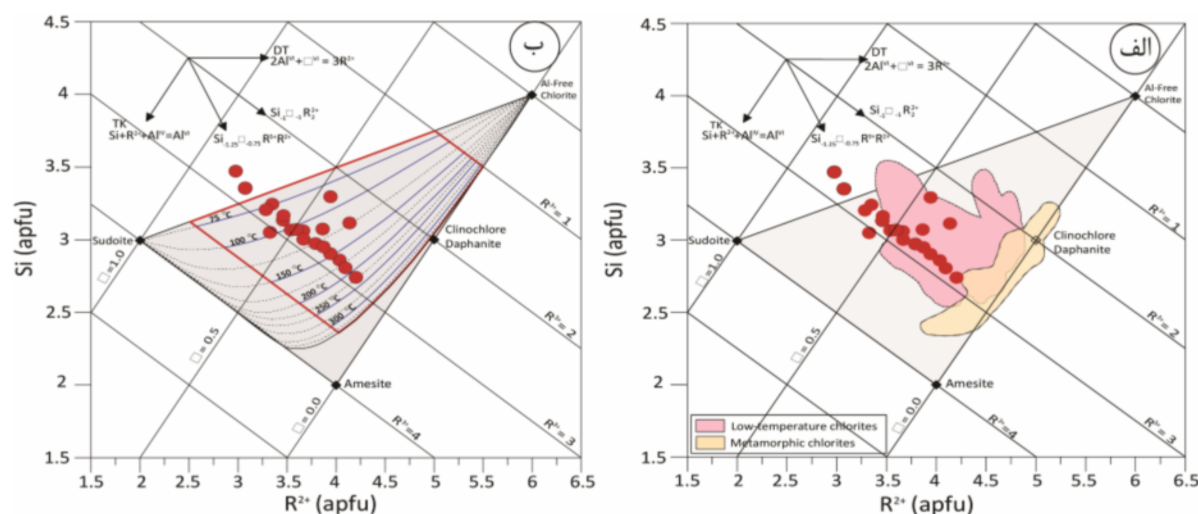
[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.3.2.6]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.3.557]

دمای تشکیل این کلریت‌ها بر پایه تابع مرجع [۴۴]، ۳۳۲ ^{o}C-۲۱۲ و از تابع مرجع [۴۵]، ۳۴۳-۱۶۵ ^{o}C محاسبه شد.

از طرفی، نمونه‌های بیوتیت کلریتی شده بر نمودار R^{2+}-Si قرار دارند [۴۶]. نمونه‌ها در شکل ۸ الف در گستره کلریت‌های دما پایین قرار گرفته‌اند و شکل ۸ ب دماهای پایین‌تر از ۲۵۰ ^{o}C را نشان می‌دهد.



شکل ۷ نمودارهای فشار-دما شبه مقاطع برای دو نمونه متاپلیتی الف) MG_{31B} و ب) MG_{39}.



شکل ۸ الف و ب) نمونه‌های بیوتیت کلریتی شده بر نمودار R^{2+}-Si [۴۶].

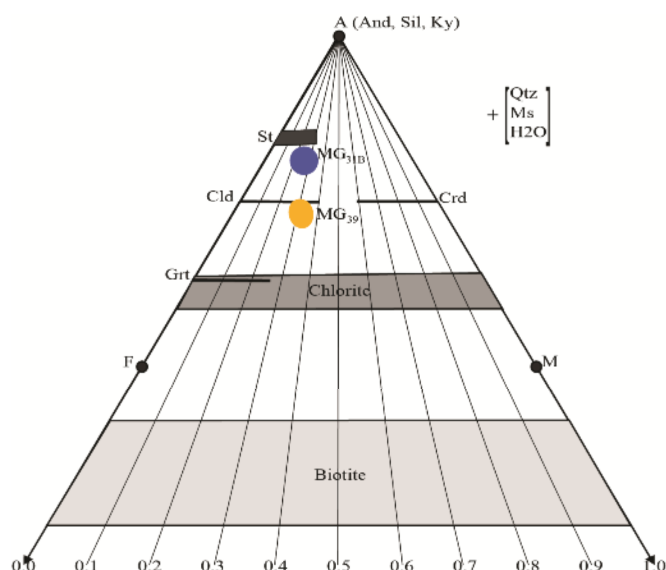
بحث

شکل ۹ نمودار AFM سامانه KFMASH برای ترکیب سنگ کل دو نمونه MG_{31B} و MG_{39} را نشان می‌دهد که آنها بالای خط گارنت - کلریت و نزدیک به قطب A قرار دارند و بنابراین هر دو غنی از آلومینیوم هستند آنها همچنین به قطب آهن نزدیک هستند [۴۷]، بنابراین پیش بینی می‌شود که سنگ‌های دگرگونی گیسور دربردارنده کانی‌های آلومینیوم‌دار و غنی از آهن مانند آندالوزیت، سیلیمانیت، استارولیت، گارنت و کلریتوئید ولی بدون کانی‌های منیزیم‌دار مانند کردیریت باشد. نسبت مولی MgO/(FeO+MgO) ترکیب سنگ کل برای هر دو نمونه، کمتر از ۰/۴ است (شکل ۹).

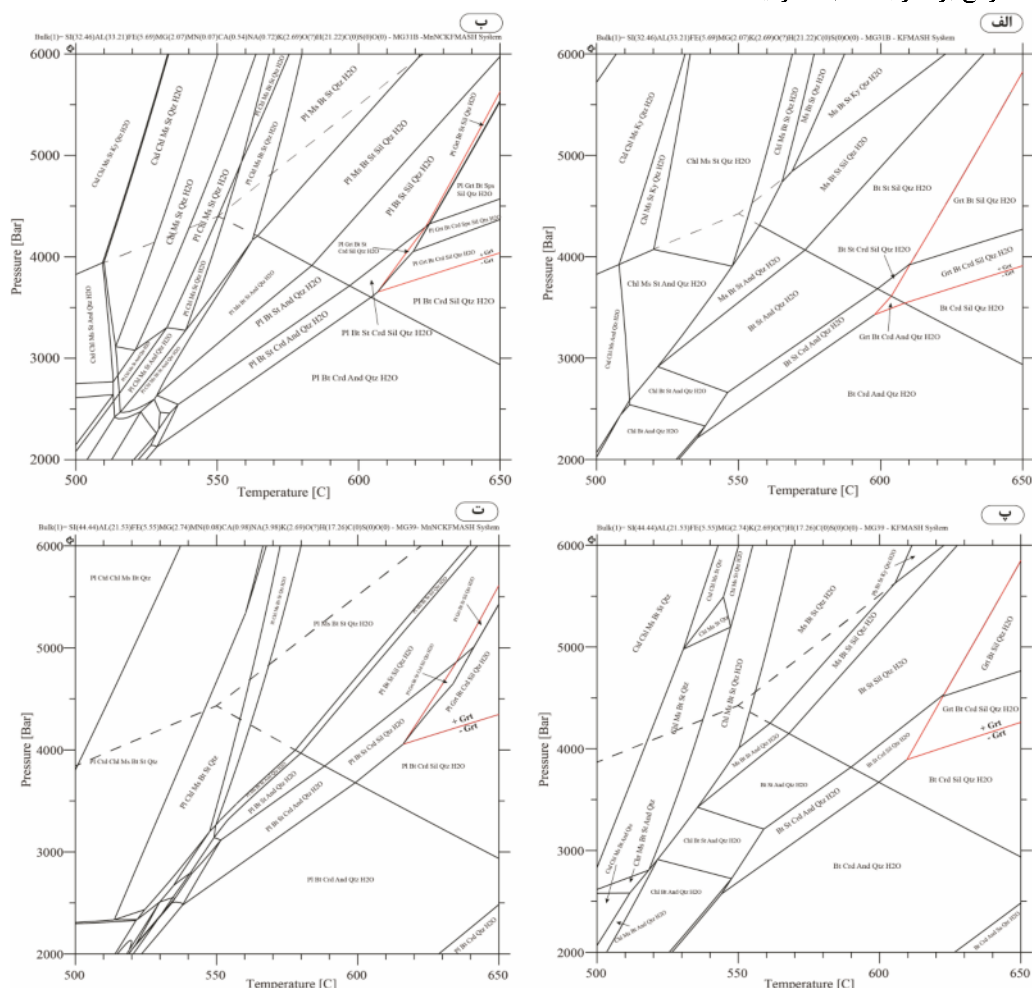
فشار محاسبه شده بر پایه روش‌های فشارسنجی بیان شده بیش از ۴ kbar است. بسیاری از سنگ‌شناسان نقطه سه‌گانه آلومینوسیلیکات‌ها را در ۵۵۰°C در ۴/۵kbar در نظر می‌گیرند [۴۸، ۴۹]. بنابراین می‌توان گفت که فشارهای زیر ۴/۵ kbar در گستره دگرگونی مجاورتی قرار دارند. مقایسه خط گارنت در نمودارهای شکل ۱۰ نشان می‌دهد که دلیل افزایش فشار در مدل‌سازهای ترمودینامیکی با استفاده از شبه مقاطع در ارتباط با ترکیب سنگ کل و به احتمال بسیار داده‌های ترمودینامیکی است [۵۰]. در این نمودارها، فشار برای خط گارنت در سامانه MnNCKFMASH نسبت به سامانه KFMASH که برای دو نمونه MG_{31B} و MG_{39} محاسبه شده است، بالاتر است. این نمودارها با استفاده از بانک اطلاعاتی tcdb55 و توسط نرم افزار theriak-Domino رسم شده‌اند. همچنین مقایسه شکل‌های ۷ و ۱۰ تفاوت داده‌های ترمودینامیکی مختلف مربوط به بانک‌های اطلاعاتی متفاوت را نمایش می‌دهند. این مقایسه نشان دهنده وجود مجموعه‌های متفاوتی از کانی‌ها در آن‌ها و نیز گستره‌های پایداری متفاوت آنهاست. از سویی، گارنت‌های تشکیل شده در شرایط دگرگونی کوهزایی و برخوردی بوسیله افزایش همزمان و با قاعده غلظت گروسولار و پیروپ در مرز بین نسل‌های مختلف گارنت، شاهدی برای رشد همزمان آن ها طی افزایش دما و فشار است [۵۰]. بررسی نیم‌رخ گارنت (مانند نمونه MG39 در شکل ۵) نشان می‌دهد که گروسولار در لبه گارنت نوع ۱ کاهش یافته و پیروپ کمی افزایش می‌یابد. افزون بر این، براساس شواهد بافتی گارنت‌های منطقه مورد بررسی پسازمین ساخت هستند (شکل‌های ۳ الف و پ)؛ بنابراین گارنت در شرایط دگرگونی مجاورتی شکل گرفته است. گارنت در پهنه سیلیمانیت دارای لبه‌هایی با Ca پایین است (شکل ۵) که نشانگر رشد آن در این پهنه است [۵۱]. همچنین منطقه‌بندی شیمیایی در گارنت ۱ از نمونه MG_{39} نشان دهنده پیشرفت دگرگونی طی نفوذ توده گرانودیوریتی است. این امر نشان می‌دهد که براساس شکل ۷، فشار دگرگونی نمی‌تواند بیش از فشار دگرگونی مجاورتی باشد (کمتر از ۴/۵ kbar). گارنت ممکن است با واکنش دو متغیره زیر در سامانه KFMASH به وجود آمده باشد:



$$Ms + Chl + Qtz = Grt + Bt + H_2O \qquad (۱)$$

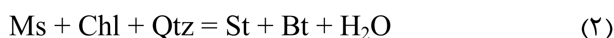


شکل ۹ نمودار AFM در سامانه KFMASH، برای ترکیب سنگ کل دو نمونه MG_{31B} و MG_{39}. که هر دو نمونه در بالای خط کلریت-گارنت و نزدیک به قطب A واقع بوده و به قطب F نزدیک هستند.



شکل۱۰ نمودارهای P-T شبه مقاطع برای نمونه‌های ترکیب سنگ کل MG_{31B} و MG_{39} که با نرم افزار Theriak-Domino تهیه شده‌اند: الف و ب) برای ترکیب سنگ کل MG_{31B}، به ترتیب برای سامانه‌های KFMASH و MnNCKFMASH. پ و ت) برای ترکیب سنگ کل MG_{39}، به ترتیب برای سامانه‌های KFMASH و MnNCKFMASH. برای هر دو نمونه، خط گارنت (خط قرمز رنگ) تابعی از ترکیب سنگ کل است.

اگر چه استارولیت یک کانی شاخص در سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای است، اما گزارش‌های بسیاری از هاله‌های دگرگونی در نقاط مختلف جهان منتشر شده است [۴۰، ۵۱، ۵۲] شواهد بافتی استارولیت در شکل ۳ ح نشان می‌دهد که بلورهای آن به صورت متقاطع و تصادفی قرار گرفته‌اند و در صحرا نیز گسترش چندانی ندارد (شکل ۱). بنابراین استارولیت در هاله دگرگونی ایجاد شده است و به علّت نبود شواهدی برای مشارکت گارنت در تشکیل استارولیت، واکنش دو متغیره احتمالی زیر در سامانه KFMASH پیشنهاد می‌گردد:

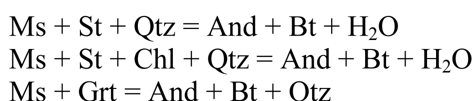


$$Ms + Chl + Qtz = St + Bt + H_2O \qquad (۲)$$

شواهد صحرایی و میکروسکوپی نشان می‌دهد که آندالوزیت نیز دارای ساخت و بافتی تصادفی و متقاطع است و چنان که در بالا اشاره شده پسا زمین ساخت بوده و بنابراین در هاله دگرگونی مجاورتی به وجود آمده است. برای تشکیل آندالوزیت، به علت وجود مجموعه‌های And+Bt±Chl، St+And+Bt±Chl و Grt+And+Bt واکنش‌های دو متغیره زیر در سامانه KFMASH پیشنهاد می‌شود:



$$Ms + Chl + Qtz = And + Bt + H_2O \qquad (۳)$$

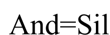


$$Ms + St + Qtz = And + Bt + H_2O$$
$$Ms + St + Chl + Qtz = And + Bt + H_2O$$
$$Ms + Grt = And + Bt + Qtz$$

همچنین می‌توان واکنش تک متغیره زیر را در سامانه KFMASH برای مجموعه St+Grt+And+Bt در نظر داشت:

$$Ms + St + Qtz = Grt + And + Bt + H_2O \qquad (۴)$$

شواهد میکروسکوپی رشد سیلیمانیت را درون لبه آندالوزیت نشان می‌دهد، بنابراین افزوده شدن سیلیمانیت به مجموعه And + St + Bt + Grt نشان دهنده واکنش زیر است:



$$And=Sil$$

شیستوارگی S_1 و حضور کانی کلریتوئید شاخص دگرگونی ناحیه‌ای است [۲۴] که در اثر نفوذ توده گرانودیوریتی گیسور که از نوع I دما پایین است [۲۱] دستخوش دگرگونی مجاورتی شده است. بنابراین با توجه به مطالب بالا از جمله شواهد دگرگونی مجاورتی، می‌توان به وجود بافت‌های تصادفی و متقاطع آندالوزیت، استارولیت، مسکوویت، گارنتِ پسا زمین ساخت و رشد سیلیمانیت منشوری به درون لبه آندالوزیت اشاره کرد که نشانگر یک دگرگونی پیشرونده و در اثر نفوذ توده آذرین بوده است.

شیستوارگی S_2 و محور کشش بودین (شکل‌های ۲ و ۳ ج) و آذرین لایه میکروگرانیتی (شکل ۱) پیشنهاد می‌کنند که فشارهای زمین ساختی سبب بروز کشش درمجموعه سنگ‌های دگرگونی گیسور شده و توده نفوذی توانسته است، که جایگیری کند.

اما شواهدی چون کلریتی‌شدن بیوتیت، سریسیتی شدن آندالوزیت و کلریتی شدن گارنت در محل شکستگی‌ها همه بیانگر وجود یک دگرگونی پسرونده و بالاآمدگی است. براساس شکل ۸، بیوتیت‌های کلریتی شده همراستا با خط R^{3+} و در گستره ۱٫۵ > R^{3+} > ۳٫۵ قرار دارند که دارای جانشینی‌های چرماک هستند. بنابراین چنان که بوردل و همکارش [۴۶] اشاره کرده‌اند، آنها در فرآیند دگرگونی به وجود می‌آیند. حال آنکه کلریت‌های بر آمده از محیط درونزایی از نوع پیروفیلیت و گیبسیت/ کلریت بدون Al بوده و افزون بر جانشینی چرماک، دارای تبادل دو-سه هشت وجهی هستند [۴۶]. البته براساس شکل ۸ ب قابل پیش‌بینی است که برخی از کلریت‌ها بالای خط سدوئیت – کلریت بدون Al قرار بگیرند که چنین کلریت-هایی ناشی از محیط‌های درونزایی و دگرسانی هستند [۴۶]. همچنین انباشت بلورهای یک کانی که جانشین کانی اولیه شده و شکل کاذب آن را به خود گرفته باشند، به علّت کاهش شرایط دما-فشار طی بالاآمدگی تفسیر می‌شود [۲۳]، بنابراین وجود چنین بافتی در بیوتیت‌های کلریتی شده نشانه‌ای از بالاآمدگی و یک دگرگونی پسرونده است. نبود منطقه‌بندی مشخص در گارنت ۲ از این نمونه و عدم تعادل ترکیب شیمیایی آن بر نمودارهای P-T شبه مقاطع (شکل ۷) نشان از رشد آن‌ها طی دگرگونی پسرونده است.

همچنین وجود ریزترک‌های شعاعی پیرامون میانبارهای کوارتز در گارنت (شکل ۳ خ) از سنگ‌هایی که دچار دگرگونی فشارهای بسیار بالا نشده‌اند، گزارش شده است [۵۳، ۵۴] که آن‌ها را ناشی از یک مؤلفه بزرگ کاهش فشار همدما می‌دانند [۵۳، ۵۵]. این شکستگی‌ها تابعی از شکل و اندازه میانبارهای کوارتز هستند [۵۶].

مسیر P-T در شکل ۷ نشان می‌دهد که سنگ‌ها در یک مسیر ساعت گرد بالا آمده‌اند که در بردارنده کاهش فشار است و در ابتدای مسیر به طور همدما دچار بالا آمدگی شده‌اند. این مسیر نیز با شواهدی بالا همخوانی خوبی دارد.

بر اساس شکل ۱، پهنه سیلیمانیت در ضلع جنوبی واقع است. چنان که پور محمد و همکاران [۲۱] اشاره کرده‌اند، برونبوم‌های ریزدانه‌ای مافیک توده گرانودیوریتی بیشتر در بخش جنوبی آن گسترش دارند. بنابراین فراوانی برونبوم‌های نوع ریزدانه‌ای مافیک به احتمال بسیار در ارتباط با افزایش دما

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.3.2.6]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.3.557]

در این قسمت بوده و بنابراین سیلیمانیت در اثر افزایش دمای ناشی از آن بوجود آمده است.

برداشت

مجموعه دگرگونی گیسور که در معرض نفوذ توده گرانودیوریتی است، دارای طیف سنگی گوناگونی از اسلیت و فیلیت تا انواع شیست‌ها (کلریتویید شیست، گارنت شیست، بیوتیت-استارولیت-گارنت شیست، آندالوزیت شیست، سیلیمانیت-آندالوزیت شیست، آندالوزیت-گارنت شیست و آندالوزیت- سیلیمانیت-استارولیت-گارنت شیست) است. کانی-های اصلی موجود در این مجموعه دگرگونی شامل کلریتوئید، گارنت، استارولیت، آندالوزیت و سیلیمانیت هستند. ترکیب داده‌های صحرایی، سنگ نگاری و ترمودینامیکی مسیر دما – فشار ویژه‌ای را برای این مجموعه نشان می‌دهد. در این مسیر بر پایه وجود ساختارهای صحرایی و سنگ نگاری (چون شیستوارگی S_1)، کانی کلریتوئید دگرگونی ناحیه‌ای را نشان می‌دهد که بوسیله دگرگونی مجاورتی پیگیری می‌شود. از جمله شواهد این دگرگونی می‌توان به وجود بافت‌های تصادفی: آندالوزیت، استارولیت، مسکوویت؛ گارنتِ پسا زمین ساخت و رشد سیلیمانیت منشوری به درون لبه آندالوزیت اشاره کرد که نشان دهنده یک دگرگونی پیشرونده و در اثر نفوذ توده آذرین است. از طرفی، شواهدی چون کلریتی شدن بیوتیت، سریسیتی شدن آندالوزیت و کلریتی شدن گارنت در محل شکستگی‌ها و ایجاد ریزترک‌های شعاعی گارنت همه بیانگر وجود یک دگرگونی پسرونده و بالاآمدگی است که در راستای حرکت عقربه‌های ساعت رخ داده است.

قدردانی

در اینجا لازم است از آقایان پروفسور اسپییر و پروفسور هولند برای راهنمایی‌های موثر علمی‌شان تشکر کنیم. از آقای مجید آروین‌نژاد برای همراهی در کارهای صحرایی قدردانی می‌شود. از معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه لرستان برای حمایت-هایشان سپاسگزاریم.

مراجع

[1] Stocklin J., "*Structural history and tectonics of Iran, A review*", Amer. Ass. Petrol. Geol. Bull., 52 (1968) 1229-1258.

[2] Stocklin J., Nabavi M. H., "*Tectonic map of Iran1:2,500,000*", Geological Survey of Iran (1973).

[3] Aghanabati S. A. "*Geology of Iran*", Geological Survey of Iran, Tehran (in Persian) 2004.

[4] Camp V., Griffis R., "*Character, genesis and tectonic setting of igneous rocks in the sistan suture zone, eastern Iran*", Lithos, 15 (1982), 221-239.

[5] Tirrul R., Bell I. R., Griffis R. J. Camp V. E., "*The Sistan suture zone of eastern Iran*" Geological Society of America Bulletin, 94 (1983), 134-156.

[6] Jung D., Keller J., Khorasani R., Marcks C., Baumann A. Horn P., "*Petrology of the Teriary magmatic activity in the north Lut area, East of Iran*", Ministry of mines and metals. Geological Survey of Iran, Geodynamic Project (Geotraverse), 51(1983), 285-336.

[7] Arjmandzadeh R., Karimpour M. H., Mazaheri S. A., Santos J. F., Medina J. M. Homam S. M., "*Sr-Nd isotope geochemistry and petrogenesis of the Chah-Shaljami granitoids (Lut block, eastern Iran)*", Journal of Asian Earth Sciences, 41(2011), 283-296.

[8] Nabavi M. H., "*An introduction to the geology of Iran*", Geological Survey of Iran. (1976)109 p.

[9] Ghaemi F., "*Geological Map 1: 100,000 Nodeh*", Geological Survey of Iran(in Persian) (2010).

[10] Foley A., "*Geological Map of 1: 250000 Gonabad*", Geological Survey of Iran (2004).

[11] B.R.G.M., "*Explanatory text of the Gonabad Quadrangle map 1:250000*", Geological Survey of Iran. (1992) p.166.

[12] Karimpour M. H., Moradi M., "*Petrology of Granodiorite and Monzonites of eastern Najmabad (Gonabad)*", 17th Iranian Society of Crystallography and Mineralogy, Bo Ali Sina University, Hamedan. (in persian) (2009)

[13] Javadi S., "*Petrological investigation of metamorphic rocks of Chah Yousef mountains area north of Geysour village*", Mashhad Ferdowsi University. Master thesis. (in persian) (2013).

[14] Powell P., Holland T. J. B., "*An internally consistent dataset with uncertainties and correlations: 3. Applications to geobarometry, worked examples and a computer program*", Journal of metamorphic Geology, 6(2)(1988), 173-204.

silicate garnets", Computers and Geosciences, 34 (2008), 1769-1780.

[27] Kohn M. J., Spear F. S., Dalziel I. W. D., "*Metamorphic P-T Path from Cordillera Darwin, a core complex in Tierra del Fuego, Chile*", Journal of Petrology, 34, part 3,(1993) 519-542.

[28] Spear F. S., "*Metamorphic phase equilibriua and pressure-temperature-time paths*", Mineralogical Society of America, Washington, D. C.,(1995) 823 p.

[29] Kohn M. J., Orange D. L., Spear F. S., Rumble D., III. Harrison T. M., "*Pressure, temperature, and structureal evolution of west-centeral New Hampshire: Hot thrusts over cold basement*", Journal of Petrology, 33(3)(1992), 521-556.

[30] Vance D., Holland T., "*A detailed isotopic and petrological study of a single garnet from the Gassetts Schist, Vermont*", Contributions to Mineralogy and Petrology, 114(1993), 101-118.

[31] Zane A., Weiss Z., "*A procedure for classifying rock-forming chlorites based on microprobe data*", Rend. Lincei Sci. Fis. Nat. Ser., 9,(1998) 51-56.

[32] Plissart G., Féménias O., Mãruntiu M., Diot H., Demaiffe D., "*Mineralogy and geothermometry of gabbro-derived list venites in the Tisovita-Iutiophiolite south western Romania*", Can. Mineral. 47(2009), 81-105.

[33] Wiewióra A., Weiss Z., "*Crystallochemical classifications of phyllosilicates based on the unified system of projection of chemical composition: II. The chlorite group*", Clay Minerals, 25(1990), 83-92.

[34] Bayliss P., "*Nomenclature of the trioctahedral chlorites*", Canadian Mineralogist, 13(1975), 178-180.

[35] Juurinen A., "*Composition and properties of staurolite*", Ann. Acad. Sci. Fennicae, Ser. A, III (Geol. Geogr.), 47(1956), 1-53.

[36] Holland T.J.B., Powell R., "*An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest*", J. Metamorph. Geol., 16(1998), 309-344.

[15] Spear F. S., Menard T., "*Program GIBBS: A generalized Gibbs method algorithm*", American Mineralogist, 74 (1989), 942-943.

[16] Spear F. S., Kohn M. J., "*Program Thermobarometry, version 2.1*", GTB program manual,(1999) 1-42.

[17] Yavuz F., Kumral M., Karakaya N., Karakaya M. Ç., Yıldırım D. K., "*A Windows program for chlorite calculation and classification*", Computers and Geosciences, 81(2015), 101-113.

[18] De Capitani, C., Brown, T. H., "*The computation of chemical equilibria in complex systems containing non-ideal solutions*", Geochimica et Cosmochimica Acta, 51(1987), 2639-2652.

[19] Kertz R., "*Symbols for rock-forming minerals*", American Mineralogist, 68 (1983), 277-279.

[20] Whitney D.L., Evans B.W., "*Abbreviations for names of rock-forming minerals*". Am. Mineral. 95,(2010) 185–187.

[21] Pourmohammad A. S., Ahmadi Khalaji A., Homam M., Tahmasebi Z., Ebrahimi M., "*Geochemistry, petrogenesis and tectonic setting of Geysour granitoid, East Gonabad*", Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCES, 29(2020), 137-150. (in Persian)

[22] Homam S. M., Ghaemi F., "*The mechanism of fibrolite formation in the contact aureole of Mashhad*", Iranian Society of Crystalography and Mineralogy.Vol. 16, No. 1(2008).

[23] Barker A. J., "*Introduction to metamorphic textures and microstructures*", Springer US.(1998) 275.

[24] Deer W. A., Howie R. A., Zussman J., "*Rock-forming minerals: Orthosilicates*", Geological Society, Vol. 1A,(1997) 917.

[25] Moazzen M., "*Chlorite-Chloritoid-Garnet Equilibria and Geothermometry in the Sanandaj-Sirjan metamorphic belt, southern Iran*", Iranian Journal of Science & Technology, Transaction A, 28, No. A1(2004).

[26] Locock A. J., "*An Excel spreadsheet to recast analyses of garnet into end-member components, and a synopsis of the crystal chemistry of natural*

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.3.2.6]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.3.557]

[47] Likhanov, I. I., Reverdatto A. V.V., "Mineral assemblages of the Al_2SiO_5 "triple point" in metapelites", *Doklady Earth Sciences, Vol. 448, No. 2, (*2013*)pp. 193–196*.

[48] Holdaway M. J., Mukhopadhyay B.,"A reevaluation of the stability relations of andalusite: Thermochemical data and phase diagram for the aluminum silicates", American Mineralogist (1993) 78 (3-4): 298-315.

[49] Bucher K., Grapes R., "*Petrogenesis of Metamorphic Rocks*", *S*pringer, 2011.

[50] Likhanov I. I., Reverdatto A. V.V., Kozlov P. S., Vershinin A. E., *The Teya Polymetamorphic Complex in the Transangarian Yenisei Ridge: An Example of Metamorphic Superimposed Zoning of Low_ and Medium_Pressure Facies Series*", *Doklady Earth Sciences, 2011, Vol. 436, No. 4, pp.509–514.*

[51] Pattison D.R.M., Tinkham D.K., "*Interplay between equilibrium and kinetics in prograde metamorphism of pelites: an example from the Nelson aureole, British Columbia*", Journal metamorphic Geol., 2009 27 249-279.

[52] Kennan P.S., *"the Occurrence of cordierite and staurolite in a part of the Leinster granite aureole; a textural study*", Sci. Proc. Roy. Soc. Dublin, Ser. A, 5 (1974), 131-136.

[53] Wendt A.S., D'Arco P., Goffé B., Oberhänsli R., "*Radial cracks around α-quartz inclusions in almandine: constraints on the metamorphic history of the Oman Mountains*", Earth and Planetary Science Letters, 114(1993), 449-461.

[54] Whitney D. L., "*Garnets at open systems during regional metamorphism*", Geology, 24(1991), 147-150.

[55] Whitney D. L.,"*Calcium depletion halos and Fe-Mn-Mg zoning around faceted plagioclase inclusions in garnet from a high-grade pelitic gneiss*", Am. Mineral., 76(1996), 493-501.

[56] Whitney D. L., Cooke M. L., Du Frane S. A., "*Modeling of radial microcracks at corners of inclusions in garnet using fracture mechanics*", Journal of Geophysical Research, 105(2000), 2843-2853.

[37] Ferry J. M., Spear F. S., "*Experimental calibration of the partitioning of Fe and Mg between biotite and garnet*", Contributions to Mineralogy and Petrology, 66(1978), 113-117.

[38] Hodges K.V., Crowley P.D., "*Error estimation and empirical geothermobarometry for politic systems*", *Am. Mineral. 70 (1985), 702-709.*

[39] Foster G., Vance D., Argles T., Harris N., "*The Tertiary collision-related thermal history of the NW Himalaya*", Journal of Metamorphic Geology, 20(2002), 827-843.

[40] Pattison D. R. M., Vogl J. J. "*Contrasting sequences of metapelitic mineral-assemblages in the aureole of the tilted Nelson Batholith, British Columbia: implications for phase equilibria and pressure determination in andalusite-silimanite-type settings*", Canadian Mineralogist, 43(2005), 51-88.

[41] Spear, F. S., Pyle, J. M., *Theoretical modeling of monazite growth in a low-Ca metapelite*", Chemical Geology, 273(2010), 111-119.

[42] Wolfe, O. M. Spear, F. S., "*Determining the amount of overstepping required to nucleate garnet during Barrovian regional metamorphism, Connecticut Valley synclinorium*", Journal of Metamorphic Geology, 36(2018), 79-94.

[43] Inoue, A., Meunier, A., Patrier-Mas, P., Rigault, C., Beaufort, D., Viellard, P.," *Application of chemical geothermometry to low-temperature trioctahedral chlorites*", Clays and Clay Minerals, 57(2009), 371-382.

[44] Kranidiotis, P., and MacLean, W., "*Systematic of chlorite alteration the Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec*", Econ. Geol. 82(1987), 1898-1911.

[45] Cathelineau, M., "*Cation site occupancy in chlorites and illites as function of temperature*", Clay Miner., 23(1988), 471-485.

[46] Bourdelle, F. Cathelineau, M.,"*Low-temperature chlorite geothermometry: a graphical representation based on a T–R^{2+}–Si diagram*", Eur. J. Mineral., 27(2015), 617-626.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.3.2.6]

[DOI: 10.29252/ijcm.28.3.557]